

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra automatizační techniky a řízení

Průmyslové sítě WLAN s podporou inteligentní instrumentace

WLAN Industrial Networks with Intelligent Instrumentation Support

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3902V010 Automatizace technologických
procesů
Doktorand: Ing. Miroslav Mahdal
Školitel: Prof. Ing. Antonín Víteček, CSc., Dr.h.c.

Ostrava 2011

Předmluva

Disertační práce tvoří souhrn poznatků, vlastních zkušeností a výsledků získaných během doktorského studia na Katedře automatizační techniky a řízení Fakulty strojní, VŠB – Technické univerzity Ostrava. Rád bych na tomto místě poděkoval všem zaměstnancům katedry a zejména pak panu Prof. Dr. RNDr. Lubomíru Smutnému a školiteli panu Prof. Ing. Antonínu Vítěčkovi, CSc., Dr.h.c. za pomoc během studia, podporu při tvorbě této práce, námětů a věcných konzultací. Velké díky také patří celé mé rodině, zejména rodičům, kteří mi jsou velkou oporou nejen při studiu.

Ing. Miroslav Mahdal

Ostrava, leden 2011

Anotace

MAHDAL, M. Průmyslové sítě WLAN s podporou inteligentní instrumentace. Ostrava: Katedra automatizační techniky a řízení, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. 203 stran. Disertační práce, školitel: Víteček, A.

Disertační práce je zaměřena do oblasti bezdrátových technologií. Zabývá se tvorbou bezdrátových senzorových sítí nazývaných „smart dust“ a také možností jejich využití v oblasti řízení technologických procesů. Práce popisuje použité hardwarové a softwarové prostředky pro realizaci bezdrátových senzorových sítí s ohledem na spotřebu samotných bezdrátových modulů, s důrazem na praktické ověření algoritmů pro časové a událostní řízení sběru dat. Pro moduly byla navržena a realizována alternativní možnost solárního napájení a hardwarová část pro jejich programování. Řeší se možnosti senzorových sítí založených na platformě IEEE 802.15.4, kde byly navrženy a prakticky testovány dva typy sítí. První síť má předem definovanou topologii a počet bezdrátových stanic. Naproti tomu druhá senzorová síť je navržena jako univerzální. Další kapitoly práce se zaměřují do oblasti řízení technologických procesů, kde byla realizována úloha řízení teplovzdušného modulu. Dále se zabývám možnostmi napojení na nadřazenou síť (GSM) včetně její realizace. Pro vizualizaci a ovládání senzorových sítí společně s řízením teplovzdušného modelu byla vytvořena aplikace v prostředí Control Web 5 s názvem *Jenie Net*. Ta umožňuje nejen vzdálenou konfiguraci bezdrátových modulů a zpracování dat, ale také prezentaci dat do prostředí sítě Intranet/Internet.

Annotation

MAHDAL, M. WLAN Industrial Network with Intelligent Instrumentation Support. Ostrava: Department of Control System and Instrumentation, Faculty of Mechanical Engineering, VSB-Technical University of Ostrava, 2011. 203 pages. Doctoral thesis, supervisor: Víteček, A.

A dissertation thesis is focused on an area of wireless technologies. It deals with creation of wireless sensor networks called „smart dust“ and also with a possibility of usage in the technologic process control field. The thesis describes used hardware and software facilities for realization of wireless sensor networks with respect to power consumption of wireless modules emphasizing practical verification of algorithms for time and event-driven data collection. An alternative possibility of solar power for the modules and also hardware for programming have been designed and implemented. The thesis solves possibilities of wireless sensor networks based on IEEE 802.15.4 platform, where two types of networks have been designed and practically tested. The first network has a predefined topology and a number of wireless stations whereas the second sensor network is designed as universal. Other chapters of the thesis focus on the field of technologic process control where a task of the control of hot air aggregate has been realised. They also solve possibilities of connection to a superior network (GSM) including its implementation. The application in Control Web 5 environment named *Jenie Net*. has been created for visualization and control of sensor networks and hot air aggregate. *Jenie Net*. enables not only remote configuration of wireless modules and data processing but also data presentation to the Intranet/Internet network.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	1
1 Úvod	9
2 Přehled současného stavu	11
2.1 Měření teploty a vlhkosti štěpku	14
2.2 Inteligentní systém ovládání světel	15
2.3 Používané standardy bezdrátových technologií	18
2.3.1 <i>WLAN technologie – IEEE 802.11</i>	18
2.3.2 <i>Technologie Bluetooth IEEE 802.15.1</i>	23
2.3.3 <i>WiMAX</i>	25
2.3.4 <i>Technologie GSM</i>	26
2.3.5 <i>Technologie ZigBee a standard IEEE 802.15.4</i>	28
3 Cíle doktorské disertační práce	33
4 Hardwarové a softwarové prostředky pro realizaci senzorových sítí	35
4.1 Vývojový kit Freescale 13192EVK	35
4.2 Bezdrátové moduly Crossbow MICA2/MICAZ	37
5 Vývojový kit Jennic JN5139 – EK010	43
5.1 Použité snímače na senzorových a řídicích deskách	44
5.2 Bezdrátové moduly JN5139	49
5.2.1 <i>Systém přerušení</i>	50
5.2.2 <i>Funkce modemu</i>	51
5.3 Vývoj aplikací pro moduly JN5139	53
5.4 Tvorba programovací desky pro moduly JN5139	54
6 Alternativní zdroj napájení pro komunikační systém standardu IEEE 802.15.4	57
6.1 Solární panel jako zdroj napájení bezdrátových modulů	57
6.2 Volba typu akumulátoru pro napájení bezdrátových modulů	58
6.3 Obvod pro nabíjení Li-ION akumulátoru ze solárního panelu	59
6.4 Snižující (BUCK) měnič napětí	63
6.5 Funkční celek alternativního zdroje napájení pro bezdrátové moduly	66
7 JenNet protokol stack	69
7.1 Architektura a komponenty JenNet vrstvy	69
7.2 Identifikace modulů v síti a identita sítě	70
7.3 Topologie JenNet sítě	71
7.4 Přenos dat a směrování rámců	72

7.4.1	Připojení modulu do sítě	73
7.4.2	Proces směrování	74
7.4.3	Potvrzení o přijetí zprávy	74
7.4.4	Pořadová čísla přenášených zpráv	74
7.4.5	Auto-ping a datová odezva	75
7.5	Struktura a typy datových rámců	75
8	Služby a vazby mezi službami	79
8.1	Nabídka služeb	80
8.2	Přehled služeb	80
8.3	Vazby mezi službami	81
9	Rozhraní Jenie	83
9.1	Hlavní funkce Jenie	83
9.2	Hardwarové funkce	84
9.3	Formy Jenie	84
10	Volba vizualizačního nástroje pro vytvořené sítě	85
10.1	InTouch 10	85
10.2	Control Web 5	86
11	Aplikace Jenie Net. a programované senzorové sítě	87
11.1	Sítě ATJenie	89
11.1.1	Základní funkční struktura kódu bezdrátových modulů	90
11.1.2	AT příkazy	91
11.1.3	Inicializace a konfigurace bezdrátových modulů	95
11.1.4	Lokální a bezdrátové měření dat	96
11.1.5	Identifikace modulů v síti	101
11.1.6	Úprava a zpracování měřených dat	102
11.1.7	Tunelové spojení mezi bezdrátovými moduly	104
11.2	Sítě Jenie	104
11.2.1	Úspora elektrické energie bezdrátových modulů	111
11.3	Distribuce dat do sítě Intranet/Internet	113
12	Nasazení bezdrátové sítě pro řízení procesu	115
12.1	Popis teplovzdušného modelu	117
12.1.1	Senzory teplovzdušného modelu	119
12.2	Připojení bezdrátového modulu k teplovzdušnému modelu	121
12.3	Struktura a aplikace číslicových regulátorů	123
12.4	Algoritmy PSD regulátorů	125

12.4.1	<i>Polohový algoritmus PSD regulátoru</i>	127
12.4.2	<i>Přírůstkový algoritmus PSD regulátoru</i>	133
12.5	Algoritmus dvoupolohového regulátoru	135
12.6	Jenie Net. pro podporu řízení teplovzdušného modelu	139
12.7	Identifikace teplovzdušného modelu	143
12.7.1	<i>Identifikace pro výstup č. 1 – soustavy termistoru NR 354 20 KU umístěného na baňce žárovky</i>	143
12.7.2	<i>Identifikace pro výstup č. 2 – soustavy termistoru NR 354 20 KU umístěný 5 mm od baňky žárovky.</i>	146
12.7.3	<i>Identifikace pro výstup č. 3 – měřený termistor KTY 81 210 umístěný na baňce žárovky</i>	147
12.7.4	<i>Identifikace pro výstup č. 4 – vrtulkový průtokoměr</i>	148
12.8	Syntéza regulačního obvodu s teplovzdušným modelem	150
12.8.1	<i>Syntéza a výsledky regulačních procesů pro PS regulátor</i>	150
12.8.2	<i>Výsledky regulačního procesu pro dvoupolohový regulátor</i>	155
13	Spojení senzorové sítě a sítě pro řízení technologického procesu	159
14	Možnosti využití aplikace Jenie Net. a vytvořených senzorových sítí	163
15	Měření dosahu bezdrátových Jennic stanic	165
15.1	Měření úrovně signálu na vzdálenosti modulů	166
15.2	Měření PER a LQI při přenosu dat	168
16	Napojení senzorové sítě na vysoce-dosahovou GSM síť	171
16.1	Rozbor možností spojení Jenie sítě se sítí GSM	171
16.2	Připojení bezdrátového modulu k mobilnímu telefonu	176
16.3	Odesílání SMS a popis PDU rámce	177
17	Závěr	183
	Použitá literatura	187
	Přehled autorovy publikační činnosti	192
	Přílohy	195

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam symbolů:

a	zesílení otevřeného regulačního obvodu u metody požadovaného modelu
a, a_i, b, b_i	konstanty
e	regulační odchylka
f	kmitočet [Hz]
$G(s)$	L-přenos (Laplaceův přenos)
G_o	přenos otevřeného regulačního obvodu
G_R	přenos regulátoru
G_S	přenos regulované soustavy
G_{wy}	přenos řízení
h	hystereze
$h(t)$	přechodová funkce; grafické vyjádření $h(t)$ je přechodová charakteristika
I	elektrický proud [A]
k	relativní diskrétní čas
K	zesílení v přenosu soustavy
k_i	koeficient přenosu, $i = 1, 2, 3, \dots$
kT	diskrétní čas
k_P	zesílení regulátoru
k_{Pk}	kritické zesílení regulátoru
K_D	váha diferenční složky číslicového regulátoru
K_P	váha proporcionální složky číslicového regulátoru
K_S	váha sumační složky číslicového regulátoru
L	indukčnost
L	operátor přímé L-transformace (Laplaceovy transformace)
L^{-1}	operátor zpětné (inverzní) L-transformace (Laplaceovy transformace)
$L(\omega)$	$L(\omega) = 20\log A(\omega)$ logaritmický modul kmitočtového přenosu [dB]
m	stupeň mnohočlenu v čitateli přenosu

n	stupeň charakteristického mnohočlenu; stupeň mnohočlenu ve jmenovateli přenosu; řád diferenciální rovnice; dimenze vektoru stavových proměnných x
N	charakteristický mnohočlen; mnohočlen ve jmenovateli přenosu (kořeny = póly)
p	počet stavitelných parametrů
pp	pásmo proporcionality
q	řád integračního členu; řád astatismu (typ) regulačního obvodu
r	řád derivačního členu
r_0	váha proporcionální složky analogového regulátoru
r_{-1}	váha integrační složky analogového regulátoru
r_1	váha derivační složky analogového regulátoru
R	odpor
s	$s = \alpha + j\omega$; komplexní proměnná, nezávisle proměnná u obrazu v L-transformaci [čas ⁻¹]
s_i	kořeny mnohočlenu s komplexní proměnnou s
S	doplňková plocha nad přechodovou charakteristikou
t	čas (spojitý)
t_o	rychlost odezvy
t_r	doba regulace
T	$T = \frac{2\pi}{\omega}$; perioda (doba kmitu)
T	vzorkovací perioda; perioda
T_I	časová konstanta soustavy
T_d	dopravní zpoždění u spojitých systémů
T_D	derivační časová konstanta
T_I	integrační časová konstanta
T_i	setrvačná časová konstanta ($i = 1, 2, 3, \dots$)
T_k	$T_k = \frac{2\pi}{\omega_k}$; kritická perioda
T_n	doba náběhu
T_p	doba přechodu

T_u	doba průtahu
u	akční veličina, řízení, vstupní veličina
v	poruchová veličina
w	žádaná veličina
y	regulovaná veličina, výstupní veličina
Z	impedance
α	$\alpha = \operatorname{Re} s$; reálná část komplexní proměnné s
Δ	přírutek; tolerance regulačního pochodu
$\eta(t)$	heavisideův jednotkový skok
ω	$\omega = 2\pi f$; úhlový kmitočet [čas^{-1}]
$\varphi(\omega)$	$\varphi(\omega) = \arg G(j\omega)$; fáze kmitočtového přenosu
φ_o	fáze otevřeného regulačního obvodu
κ	překmit

Seznam zkratk:

A/D	<i>Analogue-to-Digital Converter</i> ; analogově digitální převodník
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> ; metoda šifrování dat
AHI	<i>Application Hardware Interface</i> ; aplikační hardwarové rozhraní
AP	<i>Access Point</i> ; přístupový bod je zařízení Wi-Fi sítě, ke kterému se připojují klienti
API	<i>Application Programming Interface</i> ; rozhraní pro programování aplikací
APL	<i>Application Layer</i> ; aplikační vrstva protokolu ZigBee
APS	<i>Application Support Sublayer</i> ; pomocná aplikační podvrstva protokolu ZigBee
AT-Jenie	rozhraní vyšší vrstvy pro možnost ovládání sítě a periférií pomocí AT příkazů
CCK	<i>Completary Code Keying</i> ; technika modulace používaná ve WLAN sítích 802.11a/b/g
CMOS	<i>Complementary Metal – Oxide – Semiconductor</i> ; technologie používající se na výrobu elektronických součástek a integrovaných obvodů; mezi nejdůležitější vlastnosti CMOS patří vysoká odolnost proti šumu a nízká spotřeba ve statickém stavu

CPU	<i>Central Processor Unit</i> ; mikroprocesorová jednotka
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> ; metoda s vícenásobným přístupem a nasloucháním nosné (CSMA); jejich charakteristikou je, že před začátkem vysílání paketu stanice určitý čas poslouchá, zda je přenosové médium volné
CTS	<i>Clear-To-Send</i> ; slouží k řízení vysílaných dat; modem tímto signálem oznamuje terminálu, že komunikační cesta je volná
D	derivační složka analogového regulátoru, diferenční složka číslicového regulátoru
D/A	<i>Digital-to-Analog Converter</i> ; digitálně analogový převodník
dBm	zkratka pro poměr výkonu v decibelech (dB) měřeného výkonu vztažený na 1 mW
DFIr	<i>Diffused Infrared</i> ; technika přenosu, kterou přinesl standard IEEE 802.11; pracuje v infračerveném spektru, na frekvencích 300 až 428 GHz
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i> ; technologie umožňující přechod na jiné frekvence mezi příjmem a přenosem dat na základě měření vlastností kanálu
DIO	<i>Digital Input Output</i> ; vstupně výstupní digitální rozhraní
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> ; technika přímého rozprostřeného spektra; je jednou z metod pro rozšíření spektra při bezdrátovém přenosu dat
DTR	<i>Data Terminal Ready</i> ; terminál tímto signálem oznamuje modemu, že je připraven komunikovat
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> ; jedná se o další vývojový stupeň v technologii GSM; nabízí několik metod vylepšení pro dosažení efektivního přenosu dat s využitím 8-PSK modulace
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> ; vlastnost elektrického nebo magnetického přístroje nebo nástroje spočívající v tom, že neovlivňuje jiný objekt včetně sebe samotného a odolává působení ostatních přístrojů
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> ; elektromagnetická interference neboli elektromagnetické rušení je proces, při kterém se signál, generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů; EMI se zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů

EMS	<i>Electromagnetic Susceptibility</i> ; elektromagnetická citlivost či elektromagnetická odolnost vyjadřuje schopnost zařízení pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i> ; hodnota ekvivalentního sériového odporu kondenzátorů vypovídající o jejich kvalitě a stáří
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> ; jedna z metod přenosu v rozprostřeném spektru; její princip spočívá v přeskakování mezi několika frekvencemi při přenosu bitů
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> ; duplex s kmitočtovým dělením je technika, při které je jedno frekvenční pásmo používáné pro přenos a další pro příjem
FFD	<i>Full Function Device</i> ; zařízení s plnými funkcemi v ZigBee síti
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> ; konfigurovatelné vstupně/výstupní piny zařízení
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> ; paketově orientovaná mobilní datová služba
GSM	<i>Global System for Mobile communication</i> ; jedná se o globální systém pro mobilní komunikaci tvořící celulární (buňkovou) síť
I	integrační složka analogového regulátoru, integrační analogový regulátor
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> ; integrované vývojové prostředí
IF	<i>Intermediate Frequency</i> ; střední digitální frekvence přijímače
ISM	<i>Industrial Scientific band</i> ; bezlicenční pásma pro rádiové vysílání; použití v oborech průmyslových, vědeckých a zdravotnických
Jenie	rozhraní mezi uživatelskou aplikací a <i>JenNet</i> síťovou vrstvou (Jennic softwarového stacku); může se jednat o API nebo AT-Jenie rozhraní
JenNet	<i>Jennic Network</i> ; Jennic síťový protokol (síťová vrstva), postavený na IEEE 802.15.4 standardu; uživatelská aplikace komunikuje s <i>JenNet</i> vrstvou přes rozhraní <i>Jenie</i>
LAN	<i>Local Area Network</i> ; lokální (podniková síť)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> ; displej z tekutých krystalů
LED	<i>Light Emitting Diode</i> ; světlo vyzařující dioda (elektroluminiscenční dioda)
LLC	<i>Logical Link Control</i> ; zajišťuje přenos fyzických datových rámců (Data frame) na konkrétní médium (Ethernet, WLAN apod.)

LQI	<i>Link Quality Indicator</i> ; vyjadřuje kvalitu linky (spojení) mezi bezdrátovými moduly
MAC	<i>Media Access Control</i> ; jedinečný identifikátor síťového zařízení
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i> ; technologie používaná v rádiové komunikaci; model pro multi-anténní komunikační systémy s významným nárůstem datové propustnosti a dosahu při zachování šířky pásma
NWK	<i>Network Layer</i> ; jedná se o 3. vrstvu ISO/OSI síťové vrstevové architektury; tato vrstva se stará o směrování v síti, síťové adresování apod.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i> ; technika multiplexu a modulace, založená na frekvenčním dělení do sub-pásem
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> ; standardizace komunikace v počítačových sítích (propojení otevřených systémů), kterou zahájila organizace ISO; jeho hlavní částí je referenční model ISO/OSI
P	proporcionální složka analogového (číslicového) regulátoru, proporcionální analogový (číslicový) regulátor
PAN ID	<i>Personal Area Network Identification</i> ; identifikátor PAN sítě
PER	<i>Packet Error Rate</i> ; vyjadřuje počet chybně přenesených datových paketů děleno počtem vyslaných paketů
PHY	<i>Physical Layer</i> ; vrstva ISO/OSI modelu vrstevové síťové architektury; podporuje fyzickou komunikaci; aktivuje a udržuje fyzické spojení
PI	proporcionálně integrační analogový regulátor
PID	proporcionálně integračně derivační analogový regulátor
PS	proporcionálně sumační číslicový regulátor, číslicový regulátor PI
PSD	proporcionálně sumačně diferenční číslicový regulátor, číslicový regulátor PID
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> ; pulsně šířková modulace
QoS	<i>Quality of Services</i> ; definování služeb a požadavků pro zabezpečení určitého typu síťového provozu v požadované kvalitě (např. přenos videa, hlasu apod.)
RAM	<i>Random Access Memory</i> ; paměť s přímým přístupem
RF	<i>Radio Frequency</i> ; radiová frekvence
RFD	<i>Reduced Function Device</i> ; zařízení s omezenými funkcemi v síti ZigBee

ROM	<i>Read Only Memory</i> ; typ paměti, jejíž obsah je dán při výrobě a není závislý na napájení
RTS	<i>Request-To-Send</i> ; terminál tímto signálem oznamuje modemu, že komunikační cesta je volná
SCADA/HMI	<i>Supervisory Control and Data Acquisition/Human-Machine Interface</i> ; jsou to nástroje pro vytváření programů pro vizualizaci a supervizní řízení výrobních technologií a procesů
SDK	<i>Software Developer's kit</i> ; sada instalačních softwarových nástrojů
SCI	<i>Serial Communications Interface</i> ; asynchronní sériová komunikační sběrnice používaná pro komunikaci mezi mikroprocesory a periferními zařízeními, např. pamětí EEPROM apod.
SCK	<i>Serial clock input</i> ; hodinový vstup
SDM - OFDM	<i>Space Division Multiplexing - Orthogonal Frequency Division Multiplex</i> ; metoda prostorového dělení, multiplexu a modulace, založená na frekvenčním dělení sub-pásem (využívaná např. u standardu IEEE 802.11n)
SMA	<i>SubMiniature version A</i> ; SMA rádiové konektory jsou malé vysoko-frekvenční konektory se šroubovacím mechanismem pro připojení antény
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> ; SNR je definováno jako poměr výkonu signálu k velikosti rušení (šumu)
SOFDMA	<i>Scalable OFDMA</i> ; technika používaná v mobilní technologii WiMAX (IEEE 802.16e) podporující regulaci spektra; mění počet OFDM nosných při změně šířky kanálu
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> ; sériové periferní rozhraní; často se využívá pro komunikaci mezi mikroprocesory a ostatními integrovanými obvody
Stack	soubor softwarových vrstev, využívané k provozu systému; na nejvyšší úrovni (vrstvě) je uživatelská aplikace a na nejnižší je rozhraní pro přístup k přenosovému médiu
TDD	<i>Time Division Duplex</i> ; duplex s časovým dělením, přenosy na sestupné (downlink) a přenosy na vzestupné cestě (uplink) probíhají na stejné frekvenci, ale v jiný čas
TDM/TDMA	<i>Time Division Multiplex/Time Division Multiple Access</i> ; technologie efektivního přidělování šířky pásma klientům
TPC	<i>Transmit Power Control</i> ; technologie pro řízení vysílacího výkonu
TVM	<i>TeploVzdušný Model</i> ; laboratorní model teplovzdušné soustavy

UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> ; sériové komunikační rozhraní
WAN	<i>Wide Area Network</i> ; síť pokrývající rozsáhlou plochu (překračující hranice města, regionu, státu)
WECA	<i>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</i> ; Aliance, která byla v roce 1999 přejmenována na Wi-Fi Alliance; organizace se zabývá produkty od různých výrobců, které jsou certifikovány podle standardů IEEE 802.11
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i> ; původní zabezpečení technologie Wi-Fi, je součástí IEEE 802.11 standardu, které je v dnešní době již poměrně nedostačující
WiMAX Forum	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum</i> ; organizace složená z firem angažující se v oblasti technologie WiMAX; prosazuje a certifikuje kompatibilitu a interoperabilitu těchto bezdrátových produktů
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> ; označení bezdrátových sítí (WLAN) pracujících podle normy IEEE 802.11
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> ; bezdrátová lokální síť
WPA	<i>Wi-Fi Protected Access</i> ; druh zabezpečení bezdrátových sítí (Wi-Fi) vytvořený aliancí Wi-Fi
ZDO	<i>ZigBee Device Object</i> ; objekt ZigBee zařízení

1 Úvod

Vývoj v oblasti bezdrátových technologií jde nezadržitelně kupředu, což dokládá množství bezdrátových standardů, které byly v posledních letech schváleny. Bezdrátové technologie se staly trendem v komunikaci a mají obrovské vyhlídky do budoucnosti, kde se do nich vkládají stále větší naděje a nemalé finanční prostředky. Tyto prostředky mimo jiné putují do vývoje malých inteligentních bezdrátových senzorů, které jsou nazývány jako tzv. „chytrý prach“, ale také do komplexní automatizace. Bezdrátové inteligentní senzory se uplatňují pro monitorování stavů zařízení, ovládání či řízení technologických procesů. Nejedná se pouze o oblasti průmyslové. Nalezneme je také např. ve zdravotnictví nebo spotřební elektronice.

Disertační práce se zabývá bezdrátovými technologiemi a jejich začleněním do aplikačního použití. Jednou z významných oblastí je již zmiňovaná oblast průmyslové automatizace a průmyslových sítí, do kterých spadá také bezdrátová technologie standardu IEEE 802.15.4. Tuto technologii můžeme nalézt implementovanou do různých bezdrátových modulů, které mohou být součástí celých vývojových kitů. Moduly se obvykle skládají z vlastní sensorové části, řídicí jednotky, paměti, komunikační jednotky a napájení. Protože technologie poskytuje nízkonákladové a nízkopříkonové řešení, pak jsou velmi často bezdrátové moduly napájeny z akumulátorů, přičemž pracovní výdrž je závislá na využití tohoto inteligentního senzoru. V případě, kdy je potřeba měřit veličiny s malou frekvencí vzorkování, může modul v době nečinnosti přecházet do režimu se sníženou spotřebou, čímž lze předpokládat skutečně dlouhodobou funkčnost závislou na akumulátorovém zdroji napájení.

Tato technologie je v dnešní době velmi atraktivní a vytváří pohodlné řešení pro širokou škálu možných uplatnění. Její nasazení nalezneme především tam, kde z nějakého důvodu nelze použít klasické metalické vedení, např. u rotačních systémů, rozsáhlých sensorových sítí apod. Toto jsou typické oblasti, kde nelze kabelové vedení použít nebo je spíše na obtíž. V případě rozsáhlých sensorových sítí, ve špatně přístupných podmínkách, je rovněž kabelové vedení velmi nevhodné, navíc značně nákladné, pokud uvažíme, že celá síť je složena z několika desítek, stovek a někdy až několika tisíc senzorů. Náklady na integraci snímačů v provozu, které poté pracují několik desítek let, jsou celkem přijatelné. Ovšem při úpravách a změnách, které se v průmyslové výrobě velmi často dějí, představují náklady na kabeláž citelnou položku. Navíc při použití signálových převodníků s bezdrátovým řešením je možné přenášet a sbírat data, která nemohla být doposud přenášena. Velkou výhodou je také zabezpečení bezdrátového přenosu informací. Tento standard má velkou šanci prosadit se jako přímá náhrada různých komunikačních rozhraní, jako např. RS-232/485 a v některých aplikacích i jako náhrada průmyslových sběrnic. Proto je téma bezdrátových technologií spadající nejen do průmyslových oblastí stále velmi diskutované a žádoucí.

2 Přehled současného stavu

Bezdrátové technologie se staly nedílnou součástí každého člověka. Setkáváme se s nimi téměř každý den, obklopují nás, aniž bychom si to uvědomovali. GSM technologii snad ani není potřeba zmiňovat, protože tato technologie a služby jsou masivně využívány, stejně jako bezdrátové technologie pro širokopásmové připojení. Tady vyčnívají především technologie vycházející ze standardu IEEE 802.11, které jsou využívány hlavně pro připojení k Internetu. Ostatní bezdrátové technologie ovšem nejsou nijak pozadu.

V práci jsou popisovány nejen různé specifikace, které vznikly ze standardu IEEE 802.11, ale také technologie WiMAX, Bluetooth, či hlavní téma disertační práce a to je poměrně stále ještě nová technologie standardu IEEE 802.15.4. I když se jedná o standard definující poměrně nízkorychlostní datový přenos, můžeme nalézt jeho uplatnění v nejrůznějších oblastech.

Aplikační oblasti, kde zařízení standardu IEEE 802.15.4 technologie poskytuje velmi levné řešení, jsou například:

Komerční a domácí automatizace - elektronické ovládání uvnitř budov může být implementováno pomocí bezdrátové sítě, např. ovládání topení, klimatizace, větrání, osvětlení, žaluzií, záclon, otevírání dveří, ovládání dveřních zámků i pro různé elektronické zábavní systémy (hudební přehrávače, jako rozhraní pro různé typy hraček, her apod.). Dále pak z průmyslové automatizace se může jednat o využití pro monitorování výrobních procesů, přenosu informací ze snímačů apod., [Jennic 2010].

Zabezpečovací technika - důležitá oblast je také zabezpečení komerčních budov a domácností - zabezpečení proti vstupu nepovoleným osobám, požární ochrana (zjišťování požárů), [Jennic 2010].

Zdravotní péče - zde se využívá různých senzorů a diagnostických zařízení, které mohou být propojeny přes bezdrátovou síť. Vytvořené aplikace mohou bezdrátově monitorovat stav pacienta během zdravotní péče, kondičního tréninku, provádět vzdálenou diagnostiku pacienta apod., [Jennic 2010].

Automobilové technice - oblast automobilů nabízí velké množství senzorů a diagnostických zařízení, které poskytují ideální aplikace pro bezdrátové sítě. Jako příklad může být uvedeno snímání tlaku v pneumatikách, kde není možné využít kabelového spojení se snímačem, [Jennic 2010].

Zemědělství - bezdrátové sítě mohou pomoci farmářům k monitorování půdy a tím vytvářet ideální podmínky pro pěstování plodin a zvýšit tak další výnosy. Zde jsou nároky na široký geografický rozsah, a proto se zde výhodně využívá topologie strom nebo síť, která umožňuje vytvářet síť modulů, se schopností komunikovat mezi uzly až ke koordinátoru sítě na velkou vzdálenost, [Jennic 2010].

To je jen část odvětví, kde se tato stále rozvíjející technologie může uplatnit, nebo již zdárně uplatňuje.

Primárně se ale využívá pro tvorbu rozsáhlých senzorových sítí. ZigBee standard je navržen pro aplikace, ve kterých je potřeba přenášet pouze malé objemy dat a kde je vyžadována velmi nízká spotřeba bezdrátových modulů. Koncové zařízení tak mohou být bez problémů napájeny z akumulátorů, což je obrovským plusem pro měření v oblastech, které jsou bez možnosti přívodu elektrické energie ze sítě. Typickým příkladem může být právě zmíněná oblast zemědělství pro monitorování většího územního celku. Proto se v disertační práci také zaměřuji na možnost alternativního zdroje napájení solárními články, které nabíjejí akumulátory, čímž se výrazně prodlužuje životnost práce modulů bez zásahu člověka.

Všechna nová zařízení, která chtějí využívat bezdrátovou technologii, musí zohledňovat spotřebu energie a v mnoha případech umožňovat i správu spotřeby, která může být řízena přímo uživatelem. Uživatel musí v samotném centru jeho zájmu cítit jistou zodpovědnost za spotřebu elektrické energie a usilovat o její snížení. A právě ZigBee technologie, která je postavena na standardu IEEE 802.15.4 je nejpřijatelnějším řešením v komunikaci mezi nenáročnými zařízeními (nejčastěji inteligentními senzory), které komunikují mezi sebou a centrální stanicí v autokonfigurovatelné síti. Díky optimalizacím komunikačních a směrovacích protokolů může být síť složena z několika stovek bezdrátových stanic.

V závislosti na síťové vrstvě může mít síť určitou topologii. Topologie nám říká, jak bude síť s moduly vypadat a jak bude komunikace mezi nimi probíhat. Nejčastěji se jedná o typ sítě hvězda, strom nebo síť (mesh). Typ strom a síť jsou nejpoužívanější, co se do počtu možných připojitelných stanic týče.

V dnešní době se setkáváme se ZigBee technologií implementovanou do různých bezdrátových modulů, resp. komplexních celků tvořící mikroprocesor a komunikační obvody. Tyto moduly mohou společně utvářet výše zmíněné síťové struktury, tedy vytvářet komplexní bezdrátové senzorové sítě. Vývoj bezdrátových senzorových sítí se sympatizuje s myšlenkou vytvořit rozsáhlou síťovou strukturu, kde moduly sítě komunikují mezi sebou a centrální řízení sítě je ponecháno na jednom modulu, koordinátoru sítě. Moduly jsou schopny automatické identifikace v síti, kterou koordinátor zakládá. Samozřejmě je kladen velký důraz na nízkou spotřebu napájecí energie, kde moduly většinou obsahují integrovanou správu napájení a režimy se sníženou spotřebou. Na trhu je v současné době více bezdrátových ZigBee modulů, ale také celých vývojových kitů pro návrh a programování aplikací do různých specifických oblastí. Moduly mohou mít integrovány snímače na desce jako např. snímače teploty, vlhkosti, zrychlení a umožňují připojení velké škály dalších snímačů různých veličin k A/D převodníkům.

Na naší katedře ATR 352 se bezdrátovými technologiemi zabýváme již několik let a po tuto dobu byly v této oblasti s moduly se ZigBee stackem vytvořeny programy, dovolující nejen přenos dat v síti mezi jednotlivými moduly, ale také jejich vzdálené ovládání. Většinou jsou zde využívány snímače, které jsou implementovány přímo na deskách bezdrátových modulů, což pro účely testování tvoří ideální řešení. První testování

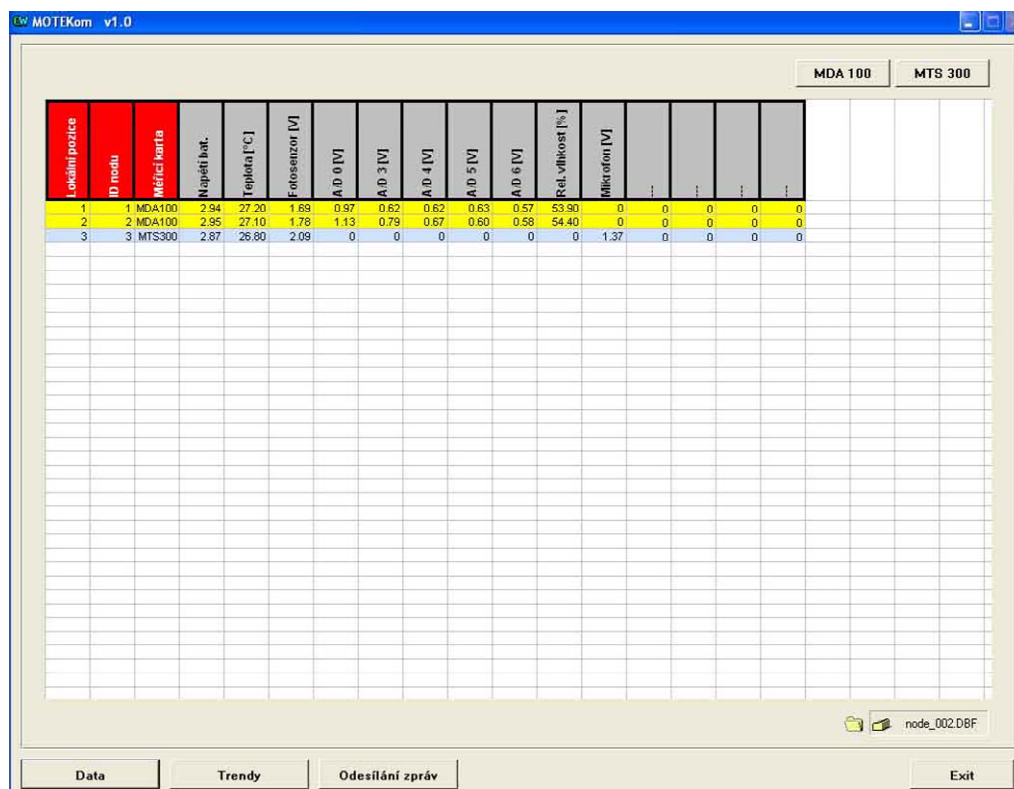
bezdrátových modulů se provádělo na modulech od společnosti Freescale, konkrétně na vývojovém kitu Freescale 13192EVK, který má v základní sestavě uvedenou demo aplikaci, demonstrující možnosti použití celé sestavy bezdrátových modulů. Aplikace je testována na dvou modulech 13192-SARD, které je možné připojit k PC pomocí sériové linky RS232. Jádrem je mikroprocesor MC9S08GT60 s A/D převodníky a komunikační obvod MC13192. Pro vývoj aplikací máme možnost využít tlačítka, LED diody a dva senzory zrychlení (jednoosý a dvouosý), které jsou na desce společně s mikroprocesorem. Získaná data jsou odesílána z mikroprocesoru do ZigBee obvodu MC13192 a ten data odesílá do vzdáleného bezdrátového modulu. Ukázkovou aplikaci můžeme vidět na obr. 1.



Obr. 1 Demo aplikace - data ze snímačů zrychlení při naklánění modulu

S těmito moduly byla také testována bezdrátová náhrada sériové linky, která byla hlavním řešením vytvořené diplomové práce [Kroužil 2007]. Jedná se o datový přenos, který na jedné straně přijímá data ze sériové linky a bezdrátově je odesílá do vzdáleného modulu, který je vysílá na sériový port.

Další práce, která byla vytvořena v této oblasti na odlišných bezdrátových modulech, konkrétně na modulech společnosti Crossbow, vývojovém kitu Crossbow MICA2/MICAz, se zabývala tvorbou software, který je schopen měřit veličiny v bezdrátové síti. Popis kompletní aplikace můžeme nalézt v disertační práci, viz [Balšánek 2007]. Práce se věnuje hardwarovým prostředkům a softwarovým možnostem v senzorových sítích se zaměřením na bezdrátové moduly Crossbow. Testovány byly algoritmy pro sběr a zpracování naměřených dat s důrazem na časové a událostně řízené odesílání dat. Vytvořená softwarová podpora s názvem MOTEKom pak umožňuje vizualizovat, zálohovat data s možností robustnosti na změny formátu příchozího řetězce. Na obr. 2 můžeme vidět ukázkou aplikace MOTEKom.



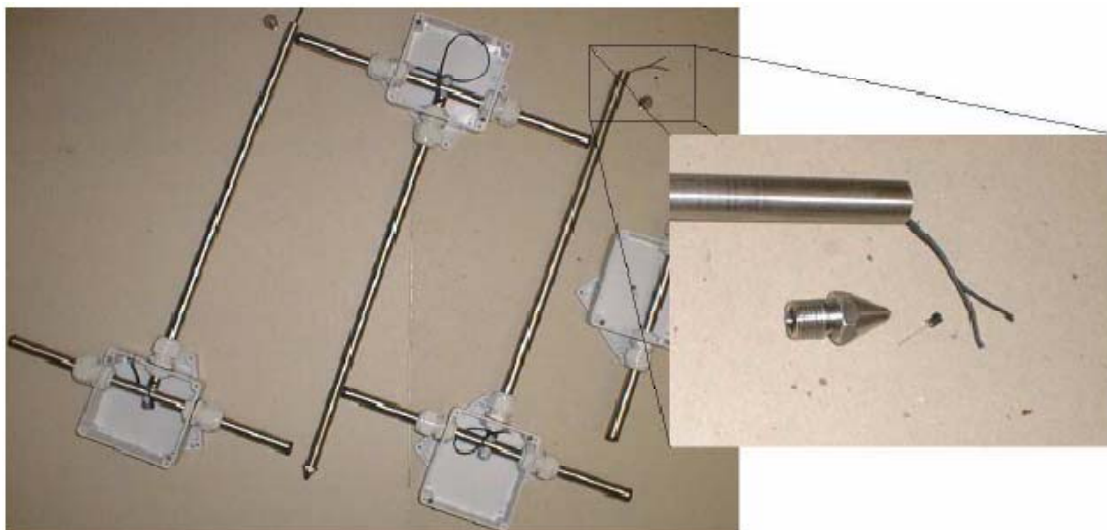
Obr. 2 Aplikace MOTEKom

Tato aplikace byla stejně jako předchozí demo aplikace otestována, kde s vytvořeným software bylo provedeno testovací měření na ověření funkčnosti celé sestavy. Testovány byly také síťové možnosti a vlastnosti, jako vzdálená konfigurace modulů, apod.

Globálně se s touto bezdrátovou technologií ještě tak masivně nesetkáváme, i když návrhy a aplikační nasazení již existují. Mohli bychom uvést několik příkladů, jako je např. měření teploty a vlhkosti štěpku nebo návrhy a již částečně realizovaná řešení jako např. ovládání veřejného osvětlení či osvětlení budov, viz [Balšánek 2007, Jennic 2010].

2.1 Měření teploty a vlhkosti štěpku

Jedná se o aplikaci využívající ZigBee technologii pro měření teploty a vlhkosti mulčovací kůry, tedy štěpku. Tato aplikace byla vyvíjena s brněnskou společností Codet spol. s r. o, kde byl navržen celý měřicí systém pro monitorování, aniž by se muselo použít kabelového vedení. Jednotlivé snímače jsou umístěny ve větších vzdálenostech od sběrné stanice, což by při kabelovém vedení mělo vliv na kvalitu přenášených dat. Přenos je ovlivněn různými rušivými vnějšími vlivy, jako je např. indukce proudů. Navíc velikost a tvar štěpku je nestálý, což rovněž kabelové vedení omezuje. Jak vypadají snímací jehly pro zavedení termistorů pod povrch haldy do hloubky 0,5 m, můžeme vidět na obr. 3.



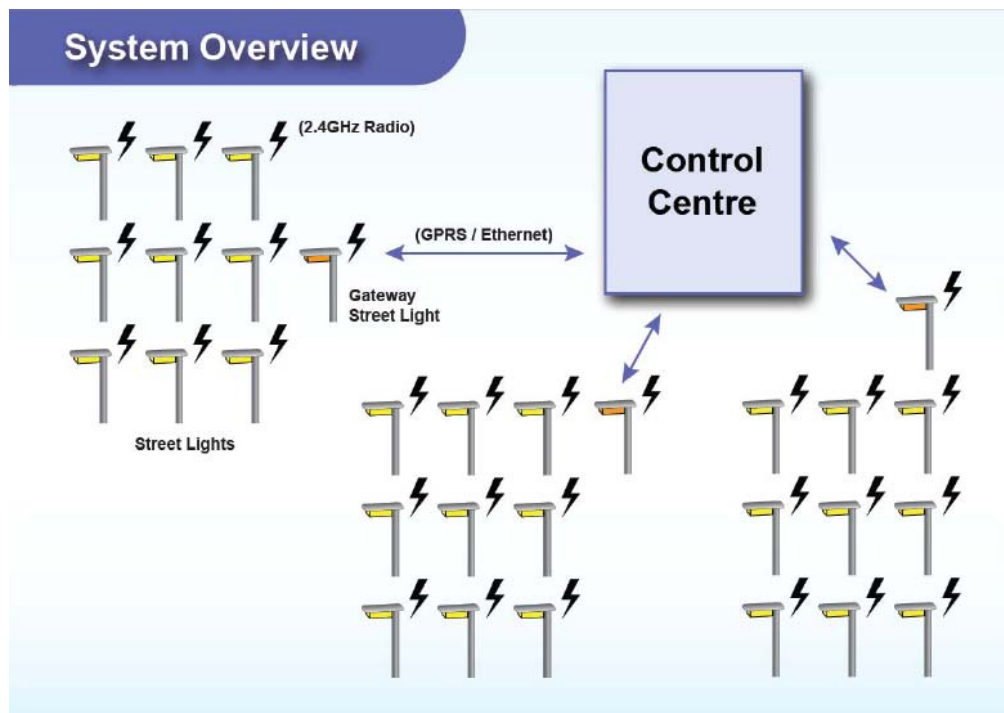
Obr. 3 Zobrazení jehly pro zavedení pod povrch haldy [Balšánek, 2007]

Společně s termistorem je zde ukryt snímač vlhkosti a v horní části bezdrátový modul s měřicí kartou MDA 100, který měří dané veličiny a bezdrátově je odesílá do vzdálené sběrné stanice, více viz [Balšánek 2007]. Přenos dat je optimalizován na maximální životnost akumulátorů napájející bezdrátový modul. Takže algoritmus bezdrátového modulu zapíná bezdrátový modul pouze v případě odesílání dat a tedy modul nemůže přijímat informace a nastavení z nadřazené řídicí aplikace a rovněž přeposílat data mezi moduly.

2.2 *Inteligentní systém ovládání světel*

Velmi často se stává, že pouliční lampy osvětlují místa, která nejsou během noci téměř vůbec využívána. Představme si řešení, kde každé pouliční světlo (lampa) nebo skupina osvětlení bude mít jeden bezdrátový modul, který bude snímat přítomnost osob v jejich blízkosti. Může se jednat o standardní pohybové čidlo. Pokud se dostane člověk do jejich přítomnosti, pak teprve tehdy bude světlo zapnuto. Když se zamyslíme nad tímto řešením, určitě nás napadne, že tato situace by ani nepotřebovala bezdrátový modul. Postačil by senzor a jednoduchá elektronika pro připojení k ovládání světla. Uvažujme ale inteligenci, kterou by mohlo osvětlení získat. Úplné noční vypnutí světla nebo ztlumení světla by mohlo být řízeno zaznamenáváním frekventovanosti pohybu osob v nočních hodinách. Pokud se člověk dostane do blízkosti osvětlení, pak může být jedno světlo rozsvíceno na základě informace ze senzoru a ostatní světla automaticky bezdrátovým podnětem, již nezávisle na senzoru pohybu. Tímto se plynule rozsvítí určitý úsek veřejného osvětlení, s ohledem na optimalizaci maximální životnosti lampy. Přičemž dosah bezdrátových stanic při přímé viditelnosti může být až 500 m. Moduly mohou pro každé světlo nebo skupinu světel (např. danou ulici) zaznamenávat a vypočítávat data o celkovém využití osvětlení v hodinách, pro plánování budoucích příprav na údržbu a servis, vypočítávat úsporu elektrické energie a přenášet informace do řídicích center. Tam mohou být získané informace dále zpracovány. Řídicí centrum nemusí data pouze získávat, ale může bezdrátově vysílat příkazy pro změnu nastavení bezdrátového modulu, či skupiny

modulů. Určité úseky a skupiny světel mohou představovat i oddělené sítě a vzdálený přenos do řídicího centra může být realizován vysoce-dosahovými bezdrátovými technologiemi jako je GSM technologie se službami (GPRS, EDGE apod.). A právě tento systém můžeme vidět na obr. 4, tak jak jej navrhuje společnost Jennic. Toto řešení je zatím stále ve vývoji, ale už teď je jasný předpoklad obrovské úspory elektrické energie.



Obr. 4 Ukázka systému pouličního osvětlení s dálkovým přenosem dat [Jennic intelligent street lighting 2009]

Takové řešení (brána spojující dvě rozdílné bezdrátové technologie) je také nastíněno v této disertační práci. Tímto mohou obce nebo města získat nemalé finanční úspory. Navíc uvažujme i kombinaci s využitím technologií LED osvětlení. Totéž platí i pro komerční budovy a domácnosti. Uvádí se, že až 50 % celkových nákladů v komerčních budovách spadá na osvětlení budov a pouze 5 % budov má nějakou formu řízení osvětlení.

Uvedené testy na již vytvořených sítích společně s informacemi o této technologii mimo naši katedru nám pomohly získat informace o tom, do jaké míry je tato technologie zvládnutá a jakým směrem se má tato disertační práce ubírat.

Proto jsem se zaměřil na bezdrátové moduly pracující na standardu IEEE 802.15.4, které využívají jiný protokol stack a tedy i odlišnou síťovou vrstvu ISO/OSI modelu. Tzn. nikoli ZigBee stackem, kterými se ubíraly dosavadní aplikace. Zvolil jsem moduly, resp. vývojový kit JN5139 od společnosti Jennic. Tato společnost nabízí jak možnost využití ZigBee protokolu stack, tak i možnost využití *JenNet* protokolu stack, který vyvíjí sama společnost. Je to alternativa k ZigBee. ZigBee Alliance definuje síťovou a vyšší vrstvy ISO/OSI modelu. Každá společnost vyrábějící bezdrátové moduly a implementující ZigBee protokol stack musí do ceny bezdrátového modulu zahrnout i poplatek za licenční

ujednání pro vývoj aplikací na ZigBee vrstvách. Jennic se tedy zaměřil na svůj vlastní vývoj *JenNet* protokolu stack, který není licencován a nezvyšuje cenu Jennic bezdrátových modulů, což byl impulz pro mne ve volbě typu bezdrátových modulů. Výhledově se společnost chce přiblížit k původní myšlence „smart dust“, neboli chytrého prachu, se kterou se sympatizovala americká vláda, aby cena těchto modulů byla pod jeden americký dolar. Popis *JenNet* protokolu stack můžeme nalézt v kapitole 7. Takže jsem se rozhodl využít tuto alternativu a vytvořit bezdrátové senzorové sítě na tomto protokolu s testováním režimů, uvádějící moduly do stavů se sníženou spotřebou.

Obecně na trhu s těmito bezdrátovými moduly chybí jakékoli softwarové zázemí, které by umožňovalo sběr naměřených dat z bezdrátových modulů, jejich zpracování, archivaci a vizualizaci. Tento problém se odvíjí hlavně od implementovaného programu a od typu bezdrátových modulů. Takže se také práce soustřeďuje na tvorbu aplikace, která by umožňovala sběr dat, jejich zpracování a distribuci do sítě Ethernet/Internet pro vytvořené bezdrátové senzorové sítě s moduly Jennic. Jedná se o nadřazenou aplikaci, resp. o řídicí a dohledové centrum pro celou síť bezdrátových modulů. Zajímavým tématem jsou také možnosti alternativního napájení bezdrátových modulů, protože technologie standardu IEEE 802.15.4 je určena pro možnosti akumulátorového napájení. Mezi základní vlastnosti použitých modulů patří:

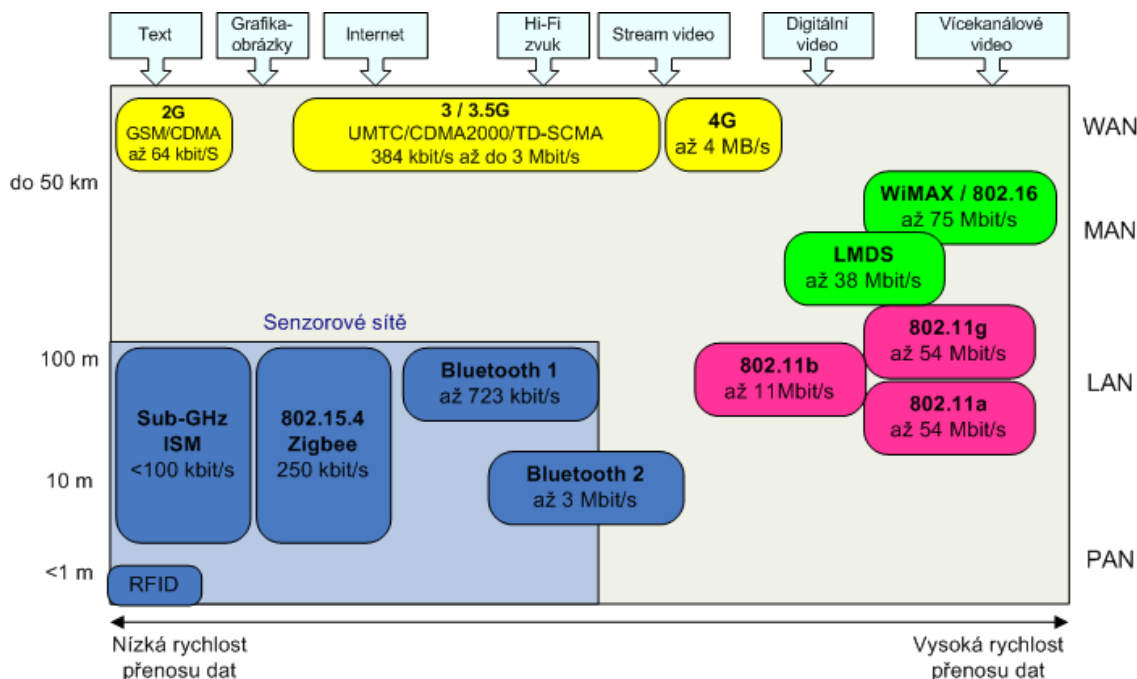
- Nízkorychlostní datový přenos (méně než 250 kbit/s).
- Volba komunikačního protokolu.
- Moduly, které jsou neaktivní (nevysílají/nepřijímají), jsou v určitých časových intervalech uvedeny do „sleep“ módů, které šetří elektrickou energii.
- Možnost akumulátorového napájení.
- Velmi snadná modifikovatelná síť (přidávání uzlů, odebírání, přesun uzlů) za chodu aplikací.

Takovýto typ sítě nebyl také dosud testován na možnosti pro použití řízení technologických procesů. Otázkou je, zda bezdrátový modul poskytuje dostatek výkonu pro regulaci technologického procesu a jaké problémy vznikají při bezdrátovém řízení. I na toto téma jsem se zaměřil. Řešení musí zahrnovat implementaci programu regulátoru do samotného bezdrátového modulu.

V neposlední řadě je velmi zajímavým tématem možnost spojení méně-dosahových sítí Jennic s vysoce-dosahovými sítěmi, jako např. s technologií GSM. Tedy vytvoření jakési brány mezi oběma technologiemi a definovat způsob předávání dat. Takto lze přenášet data ze senzorových sítí, popř. z technologického procesu na velké vzdálenosti, která je omezena pouze signálovým pokrytím GSM sítě.

2.3 Používané standardy bezdrátových technologií

Bezdrátové sítě vznikly především pro omezené potřeby mobility uvnitř objektů. V posledních několika letech WLAN technologie zaujaly ohromné místo na trhu lokálních sítí LAN. Pro přehlednost jsou nejpoužívanější typy bezdrátových technologií zakresleny na obr. 5.



Obr. 5 Přehled standardů bezdrátových technologií

Následující kapitoly se budou zabývat popisem nejpoužívanějších bezdrátových technologií, které jsou v dnešní době dostupné, či jsou trendem v oblasti bezdrátových technologií.

2.3.1 WLAN technologie – IEEE 802.11

WLAN technologie založené na standardu IEEE 802.11 představují praktické a zajímavé řešení v sítích nabízející mobilitu, flexibilitu, nízkou cenu, možnost rozmístění související s dosahem a širokou škálou použitelnosti. Vývoj těchto technologií odstartoval již v roce 1997. WLAN je datový přenosový systém určený zajistit konektivitu mezi zařízeními využívající bezdrátovou síť. Tato síť je v dnešní době mnohem více upřednostňována než klasické kabelové sítě, u kterých je uživatel vázán pevně danou infrastrukturou, která ztrácí mobilitu připojených zařízení. Rozšiřování WLAN technologií závisí na vývoji jejich standardů. Komise IEEE 802 uznávaná jako světová autorita pro LAN sítě definovala několik LAN standardů během uplynulých dvaceti let, včetně IEEE 802.3 Ethernetu, IEEE 802.5 technologie Token Ring a IEEE 802.3u, tedy 100Base-T Fast Ethernet, viz [Wi-Fi Alliance 2009].

Misí Alliance Wi-Fi je certifikovat spolupráci a kompatibilitu mezi síťovými prvky IEEE 802.11HR a rovněž podporovat tento standard. Alliance Wi-Fi tímto znovu seskupila

výrobce prvků WLAN technologií, jako např. společnosti 3 Com, Cisco-Aironet, Apple, Compaq, Dell, Fujitsu, Nokia, IBM, Samsung, Breezecom a další. Do dnešního dne nepřestala rodina IEEE 802.11 standardů přicházet s novými návrhy standardů. Nejvíce převládajícími WLAN protokoly jsou tyto příbuzné standardy: IEEE 802.11, IEEE 802.11b a IEEE 802.11g. Tato rodina standardů se zabývá fyzickými a datovými vrstvami definovanými modelem OSI.

Produkty certifikované jako IEEE 802.11b znamenají technologii Wi-Fi. Tato certifikace je poskytována Wi-Fi aliancí. Alliance Wi-Fi rovněž uznala certifikaci pro produkty IEEE 802.11a nazývané jako Wi-Fi5. V tab. 1 je uveden seznam standardů a různá odvození z 802.11:

Tab. 1 Přehled odvozených standardů od původního standardu 802.11

Název standardu	Popis
IEEE 802.11	Původní standard pro 1 až 2 Mbit/s, přenos ve 2,4 GHz pásmu.
IEEE 802.11a	Tento standard pracuje v 5 GHz pásmu a dovoluje propustnost od 6 do 54 Mbit/s.
IEEE 802.11b	Rozšíření IEEE 802.11 na přenos 5.5 a 11 Mbit/s.
IEEE 802.11c	Bezdrátové přemostění; obsaženo v IEEE 802.1D standardu (2001).
IEEE 802.11d	Mezinárodní roamingové rozšíření (2001), přístupové body přenášejí informace přístupnými kanály přijatelnou hladinou výkonu podle omezujících zákonů daného státu.
IEEE 802.11e	Jedná se o další rozšíření, standard pro kvalitu služby (QoS), který definuje specifikace QoS mechanismů pro podporu multimediálních aplikací.
IEEE 802.11F	Zabývá se standardizací protokolů mezi AP (Access Point). Dovoluje používání zařízení od různých výrobců.
IEEE 802.11g	Dovoluje dosáhnout vyššího datového toku (54 Mbit/s identický s IEEE 802.11a) v 2.4 GHz pásmu. Je použita ortogonální frekvenčně dělicí multiplexová (OFDM) modulace. Poskytuje zpětnou kompatibilitu s 802.11b (2003).
IEEE 802.11h	Zajištění IEEE 802.11a (5GHz) pro evropskou kompatibilitu (2004). Jsou uvažovány mechanismy frekvenčně dynamického výběru a řízení přenosu.
IEEE 802.11i	Vylepšený autentifikační a šifrovací algoritmus (WPA2), (2004).
IEEE 802.11j	Sbližování amerických (IEEE 802.11) a japonských standardů (je to přizpůsobování dřívějšího standardu pro japonské zákony).
IEEE 802.11k	Definuje metody a měřicí kritéria potřebné pro vyšší vrstvy protokolů.
IEEE 802.11l	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11m	Správa standardu: přenosové metody a drobné úpravy.
IEEE 802.11n	Vylepšení ve směru vyššího výkonu. Nabízí vyšší datový přenos.
IEEE 802.11o	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11p	Jedná se o bezdrátový přístup pro pohyblivá prostředí

	(automobily, vlaky, sanitky).
IEEE 802.11q	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11r	Rychlé přesuny mezi přístupovými body (roaming).
IEEE 802.11s	Zlepšení síťování, samoorganizace sítí.
IEEE 802.11T	Testovací metody a metrika. Testování výkonu apod.
IEEE 802.11u	Komunikace a propojení systémů s dalšími sítěmi (jinými než 802 sítěmi).
IEEE 802.11v	Management bezdrátové sítě (konfigurace klientských zařízení během připojení).
IEEE 802.11w	Zabezpečení rámců managementu bezdrátové sítě.
IEEE 802.11x	Rezervováno a nebude použito.
IEEE 802.11y	Standard pro běh ve frekvenčním pásmu 3650 – 3700 MHz (veřejné pásmo v USA).

Původní standard IEEE 802.11 z roku 1997 měl nejširší možnost výběru na nejnižší vrstvě PHY. Tento standard nabízel techniku přímo rozprostřeného spektra DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), kdy je každý bit nahrazený celou bitovou sekvencí a teprve poté vyslán. U této techniky se předpokládá použití přenosového pásma od 2,4 do 2,4835 GHz, rozděleného na 14 kanálů po 22 MHz, přičemž přenosová rychlost je 1 nebo 2 Mbit/s.

Dále nabízel techniku rozprostřeného spektra s přeskakováním kmitočtů FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). U této techniky se přenosové pásmo 2,4 až 2,4835 GHz rozdělilo do 75 podkanálů, přičemž každý má šířku 1 MHz. K přeskakování kmitočtů pak dochází mezi těmito podkanály, podle různých klíčů pro jednotlivé přenosy. Tím se předcházelo střetům na stejném podkanálu. Přičemž rychlost je 1 Mbit /s, volitelně 2 Mbit/s.

Jako poslední nabízel techniku přenosu infračerveným zářením DFIR (Diffused Infrared) v pásmu 300 – 428,000 GHz rychlostí 1Mbit/s, volitelně 2 Mbit/s. Protože infračervené paprsky neprojdou pevným materiálem, je tato varianta omezena vzdáleností a přímou viditelností, většinou na jednu místnost. Takový druh sítí se zpravidla v praxi nepoužívá.

Standard IEEE 802.11b – Wi-Fi

Tento standard schválený roku 1999 přinesl zrychlení přenosů až na 11 Mbit/s, ale stále pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz jako původní standard 802.11. Je zde použita modulace CCK (Complementary Code Keying), která k tomuto zrychlení přispěla. Fyzická vrstva nedává na výběr tři varianty jako původní standard 802.11, ale je zde pouze varianta s rozprostřeným spektrem DSSS. Tento standard je plně kompatibilní s původním standardem 802.11 a nabízí přenosovou rychlost 11 Mbit/s, což se jedná o nominální přenosovou rychlost. Rychlost přenosu užitečných dat je pak nazývána jako efektivní rychlost, a ta je zhruba o 30 až 40% nižší a to především i z hlediska podmínek spojených s přenosem těchto dat. Tento standard zaznamenal velké prosazení, ke kterému přispěla vzájemná kompatibilita produktů na bázi 802.11b od různých výrobců. Na tuto kompatibilitu zařízení dohlíží a vydává osvědčení sdružení WECA (Wireless Ethernet

Compatibility Alliance), která prosadila i označení tohoto standardu 802.11b za označení Wi-Fi.

Standard IEEE 802.11a – Wi-Fi5

Standard 802.11a, který je taktéž označován jako Wi-Fi5 byl schválen roku 1999, čili pochází ze stejného roku jako standard 802.11b. Od tohoto standardu se ale značně liší. Nepracuje v bezlicenčním pásmu jako 802.11 a Wi-Fi, ale využívá licenční 5 GHz pásmo. Toto pásmo umožňuje využívat vyšších přenosových rychlostí a není zde taková náchylnost k rušení jako u bezlicenčního pásma. Tento standard dosahuje přenosových rychlostí až 54 Mbit/s jako nominální hodnoty, hodnota efektivní je zhruba kolem 30 až 36 Mbit/s. Využívá techniku ortogonálního multiplexu OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

Velkou nevýhodou tohoto standardu jsou především problémy se zpětnou kompatibilitou (kvůli jinému frekvenčnímu pásmu), dále pak vyšší cena a odlišná dostupnost v různých zemích světa. Na tyto nevýhody tohoto standardu reagovala IEEE vylepšením v podobě standardu IEEE 802.11h.

Standard IEEE 802.11g

Tento standard byl schválen v roce 2003 a je jeden z nejpoužívanějších standardů. Tento standard pracuje stejně jako jeho předchůdce 802.11b v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz, ale nabízí vyšší přenosovou rychlost až 54 Mbit/s, s tím ale také nevýhodu kratšího dosahu. Zařízení pracující na standardech 802.11g a 802.11b mají zajištěnou plnou kompatibilitu. Pro komunikaci na úrovni fyzické vrstvy se využívá technika OFDM, při komunikaci se zařízeními 802.11b se ale využívá technika DSSS. Pokud dojde k připojení klienta k síti standardu 802.11g a jeho zařízení využívá standardu 802.11b, je aktivován mechanismus pro koexistenci 802.11b a 802.11g klientů v jedné síti. Klient nejdříve požádá přístupový bod o vysílání pomocí zprávy RTS (Request-To-Send) a čeká na povolení v podobě CTS (Clear-To-Send). Pro další tyto klienty od přístupového bodu to znamená nevysílat. Tento mechanismus RTS/CTS má v síti dosti vysoké režie, nicméně předchází současnému vysílání stanic využívající standard 802.11b a 802.11g a zabraňuje tak jejich kolizi. Tedy každý klient využívající standard 802.11b připojený do sítě 802.11g snižuje rychlost sítě, naopak síť složená pouze z účastníků se standardem 802.11g zajišťuje vyšší výkonnost sítě. V tab. 2 jsou nejpoužívanější typy standardů a jejich přenosové rychlosti.

Standard IEEE 802.11n

Ani rychlejší standardy Wi-Fi, tj. 802.11a/g se nemohou srovnávat s běžným ethernetem a to především v menší efektivitě bezdrátového přenosu zapříčiněné ztrátami, šifrováním, apod. Uživatelé této technologie vyžadovali mnohem vyšší rychlost, která přichází v podobě standardu 802.11n. Tento standard se od původních standardů liší hlavně ve zvýšené přenosové rychlosti pomocí principu MIMO (Multiple Input, Multiple Output).

Princip MIMO počítá s více anténami na straně vysílače i přijímače oproti tradičně používané anténě jediné (SISO – Single Input, Single Output). U klasických rádiových přenosů dochází ke zhoršení kvality signálu různými odrazy (odražené vlny od zdí apod.). Tato technika vychází z myšlenky využít odražené vlny pro zlepšení kvality příjmu a zbavit je jejich chyb a započítat je do užitečného signálu. Díky tomuto principu se rychlost navýšila až na 540 Mbit/s, došlo i k navýšení dosahu. Samozřejmě je nutné podotknout, že hovoříme o teoretické přenosové rychlosti (nominální rychlosti).

Skutečná přenosová rychlost (efektivní rychlost) v praxi bývá zcela odlišná. Tato skutečná přenosová rychlost bývá většinou menší až o desítky procent, protože se zde berou v úvahu režie a jiné prodlevy, opakované přenosy, apod. Teoretická rychlost spíše vyjadřuje, jak dlouho trvá přenos jednoho bitu, aniž by se bralo v potaz, zda jde o bit užitečný, či režijní. Na samotnou přenosovou rychlost má také vliv omezení frekvencí v příslušných pásmech, ale i prostředí, ve kterém přenos probíhá a který se velmi často dynamicky mění.

Standard 802.11n byl schválen v září roku 2009, po sedmi letech od podání prvotního návrhu. Zařízení tak mohou pracovat v 2,4 GHz a 5 GHz pásmu. Pro tento standard není problém se přizpůsobit starším sítím. To v praxi znamená snížit rychlost nebo v případě detekce těchto sítí přestoupit a uvolnit pásmo například pro standard 802.11a. Tento nový standard opírající se o zvýšení přenosové rychlosti uvažuje hlavní význam v multimédiích, jako sledování internetové televize, stahování či online poslech hudby, filmů apod. Více o standardech 802.11, viz [Wi-Fi Alliance 2009].

Tab. 2 Přehled nejpoužívanějších standardů odvozených z 802.11

Typ	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Frekvence [GHz]	2,4	5	2,4	2,4	2,4 a 5
Teoretická přenosová rychlost [Mbit/s]	2	54	11	54	300 až 600
Efektivní (reálná) rychlost [Mbit/s]	1 až 2	až 25	až 6	až 22	až 100
Mechanismus přenosu	DSSS/FHSS/DFIr	OFDM	DSSS	OFDM/DSSS	SDM – OFDM/MIMO
Dosah [m]	20	50	100	80	100

2.3.2 Technologie Bluetooth IEEE 802.15.1

Bluetooth technologie poskytuje bezdrátovou komunikaci mezi několika zařízeními na krátké vzdálenosti. Jedná se tedy o krátko-dosahový rádiový standard. Základní myšlenka byla oprostit elektronická zařízení od připojených kabelů, odstranit jejich často překážející metalické vedení a udělat je mobilními. Tato technologie prošla vývojem specifikací a byla definována standardem IEEE 802.15.1. Spadá do kategorie osobních počítačových sítí tzv. PAN (Personal Area Network) sítí.

Mezi nejdůležitější vlastnosti Bluetooth technologie patří především:

- Krátko-dosahový rádiový přenos - jednotlivé Bluetooth zařízení mezi sebou komunikují po rádiových vlnách na frekvenci 2,4 GHz.
- Nízký vysílací výkon - vysílač nespotřebovává velké množství energie, a tím zajišťuje delší výdrž při akumulátorovém napájení.
- Podpora datových, ale také hlasových přenosů (využití především jako handsfree soupravy při spojení s mobilním telefonem).
- Maximální vzdálenost jednotlivých stanic vybavených Bluetooth technologií může být až 100 metrů, reálný dosah však zpravidla bývá kolem 10 metrů.
- Univerzálnost - tuto technologii je možné nasadit do různých typů zařízení.
- Relativně nízká cena.

Mezi hlavní požadavky při návrhu technologie Bluetooth patřily především nízká cena komponentů, malé rozměry a příkon. V červenci roku 1999 byla publikována specifikace Bluetooth verze 1.0 a první výrobky s touto technologií vyšly na trh v roce 2000. V červenci roku 2003 byla publikována verze specifikací 1.1, poté specifikace 1.2 a jako další byla definována nová specifikace, umožňující komunikovat vyššími přenosovými rychlostmi, specifikace 2.0. Další verzí je specifikace 2.1, která zavádí novou modulační techniku a zvyšuje tak datovou propustnost na trojnásobnou hodnotu oproti Bluetooth specifikaci 1.2, která má datový přenos 2,1 Mbit/s. Poslední verzí je pak specifikace Bluetooth 2.2 nabízející dvě verze a to Bluetooth 2.2 10x s přenosovou rychlostí až 30 Mbit/s a Bluetooth 2.2 100x s rychlostí desetkrát větší, tedy 300 Mbit/s.

Bluetooth je provozován v pásmu ISM (Industrial Scientific Band) na frekvenci 2,4 GHz. Toto pásmo je bezlicenční a původním požadavkem při návrhu pásma, bylo zajistit celosvětovou působnost (kompatibilitu pásma). Celá šířka pásma 2,400 – 2,4845 GHz se ale ve všech zemích nepoužívá, kupříkladu ve Francii je toto pásmo omezené na rozsah 2,4465 – 2,4835 GHz.

Aby došlo k potlačení interference s dalšími signály, které v tomto pásmu ISM operují, používá Bluetooth metodu kmitočtových skoků (frequency hopping) s nominální rychlostí 1600 skoků/s. Vysílač pak mění frekvenci po každém přenosu a příjmu. Tímto je pak zajištěna větší kvalita spojení. Podle výstupního výkonu se zařízení Bluetooth dělí do tříd. Tab. 3 uvádí tyto jednotlivé třídy Bluetooth a jejich

maximální možný dosah. Hodnoty se samozřejmě liší podle prostředí, ve kterých komunikace probíhá, tedy v budovách, na volných prostranstvích apod. Více na oficiálních stránkách Bluetooth technologie [Bluetooth technologie 2009].

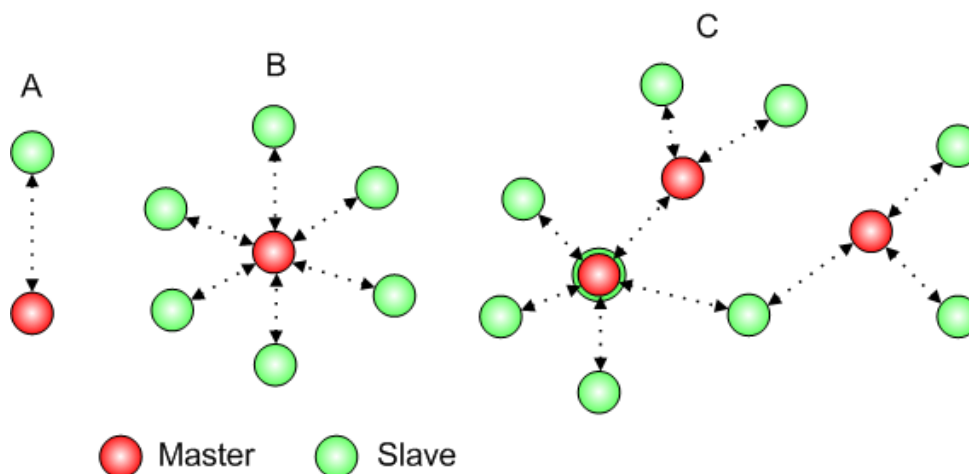
Tab. 3 Dosah a rozdělení výkonových tříd technologie Bluetooth

Třída	Maximální výstupní výkon	Minimální výstupní výkon	Dosah (přibližný)
Class 1	100 mW (20 dBm)	1 mW (0 dBm)	100 m
Class 2	2.5 mW (4 dBm)	0,25 mW (-6 dBm)	10 m
Class 3	1 mW (0 dBm)	N/A	1 m

Topologie sítí Bluetooth

U Bluetooth sítí se jedná o spojení typu master – slave, přičemž master může navázat komunikaci až se sedmi podřízenými zařízeními. Bluetooth umožňuje dva druhy spojení. Prvním typem je spojení point-to-point, při kterém je navázáno spojení pouze mezi dvěma zařízeními. Point-to-multipoint umožňuje připojení až sedmi podřízených zařízení v pozici slave, přičemž všechna komunikující zařízení využívají stejný kanál. Takový typ uspořádání se nazývá piconet síť, viz obr. 6. Protokol navíc umožňuje připojit i více podřízených zařízení k masterovi, ale zachovává se synchronizace s piconetem a tedy i s řídicím masterem.

Síť piconet může být řízena pouze jedním masterem, přičemž slave může spadat do oblasti jiné sítě (jiného piconetu), tedy může být vlastněn více mastery. Protokol také umožňuje výměnu rolí master – slave v čase, kdy jejich komunikace neprobíhá. Tyto vlastnosti pak umožňují vytvářet uspořádání typu scatternet, viz obr. 6, kde je připojeno několik piconet sítí. Každý piconet komunikuje na jiném kanálu při jiné sekvenci změn frekvence. Tyto větvené sítě obsahují několik masterů, které řídí jednotlivé podsítě a jsou mezi sebou frekvenčně synchronizovány.



Obr. 6 Bluetooth síť a.) point-to-point b.) piconet (single master) c.) scatternet (multimaster)

2.3.3 WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Jedná se o neustále vyvíjející se bezdrátovou technologii, která nabízí otevřené řešení pro bezdrátový přístup. WiMAX je definován v řadě norem IEEE 802.16. Jde o standard pro bezdrátovou distribuci dat zaměřený na venkovní sítě, tedy jako doplněk k Wi-Fi, která je spíše chápána jako standard pro vnitřní sítě. Stejně jako u technologie 802.11 je potřeba pro prosazení na trhu především vzájemná spolupráce mnoha firem. V případě standardu 802.11 to byla Wi-Fi Alliance, která standardizovala požadavky na vzájemnou kompatibilitu a interoperabilitu zařízení. Pro technologii WiMAX je podobnou organizací WiMAX Forum, která se zabývá certifikací zařízení standardu 802.16, pro vzájemnou kompatibilitu zařízení. Prvním komerčně využitelným standardem WiMAXu byl standard 802.16d – 2004, který byl podle názvu vydán v roce 2004. Jednalo se o tzv. fixní WiMAX, tedy o řešení komunikace z jednoho bodu na více lokalit a naopak (Point - to - Multipoint). Tento standard využíval OFDM modulaci s 256 subnosnými frekvencemi. Dalším standardem WiMAXu byl standard 802.16e - 2005, vydaný v roce 2005. Tento standard rozšiřuje možnosti původní fixní verze na podporu mobilních služeb. Zde byla definována modulace SOFDM s 512 až 2048 subnosnými frekvencemi, v závislosti na šířce kanálu. Došlo zde také k implementaci pokročilých rádiových technik jako je technika MIMO, zmíněná již u standardu 802.11n, BF (Beam - Forming) apod. MIMO technika, jak již byla popsána dříve, je řešení, které využívá více antén a rádií pro přenos signálu, kde dochází k vysílání případně přijímání signálu současně. Následnou selekcí dojde k výběru nejvyššího signálu. Tato technika využívá k přenosu více paralelních datových toků, které vedou ke zvýšení přenosové rychlosti. Technika Beam – Forming se snaží o zvýšení kvality signálu „směřováním“ rádiového paprsku. Jedná se o techniku, která je zaměřena na zajištění co největší hodnoty SNR (Signal to Noise Ratio). Beam – Forming dokáže vyzářený výkon v případě potřeby zaměřit do jednoho směru a tím zlepšit úroveň a kvalitu přijímaného signálu a nasadit tak největší přenosové rychlosti. WiMAX využívá dva způsoby duplexu, frekvenční FDD a časové TDD. Tyto duplexy lze jednoduše charakterizovat tak, že FDD má lepší pokrytí a dosah signálu, oproti tomu TDD nabízí lepší práci se spektrem a poměrem mezi přenosovou kapacitou u uploadu i downloadu. Reálná přenosová kapacita u FDD je 18 Mbit/s se 7 MHz kanálem, je možné se setkat také s řešením využívající 1,75/3,5 MHz. U TDD řešení je možné se setkat s 5/7 a 10 MHz kanálem, kde dosažená rychlost je běžně až 25 Mbit/s s řešením 10 MHz kanálu. WiMAX je určen pro sítě s více sektory/kanály na jednu základnovou stanici a ta je schopna nabízet propustnost desítky až stovky Mbit/s. Pokud se použijí modernější rádiové techniky jako MIMO a BF lze docílit ještě vyšší přenosové kapacity.

WiMAX umožňuje pracovat v různých frekvenčních pásmech v rozmezí 2-11 GHz. Jeho signál je silný i při pohybu do 120 km/h, např. pro využití na cestách apod. WiMAX dosahuje přenosových rychlostí až 75 Mbit/s s dosahem až 50 kilometrů a s odolností proti překážkám, tedy bez přímé viditelnosti klientské stanice a přístupového bodu. Tuto přenosovou kapacitu připojení (až 75 Mbit/s) je možné rozdělit mezi několik uživatelů

a každému z nich tak garantovat stabilní přenosovou rychlost. Další obrovskou vlastností je podpora QoS (Quality of Service), neboli řízení kvality služeb, které umožňuje na WiMAX-ových spojích provozovat např. IP telefonii nebo přenášet video v reálném čase a v dostatečné kvalitě. Celý standardizační proces WiMAX technologie (sdružující několik společností) má zajistit, aby bezdrátové technologie od různých výrobců navzájem spolupracovaly. Více o této technologii můžeme nalézt, viz [Technologie WiMAX 2009].

V dalších kapitolách budou nastíněny bezdrátové technologie, které budou hlavním předmětem v řešení disertační práce.

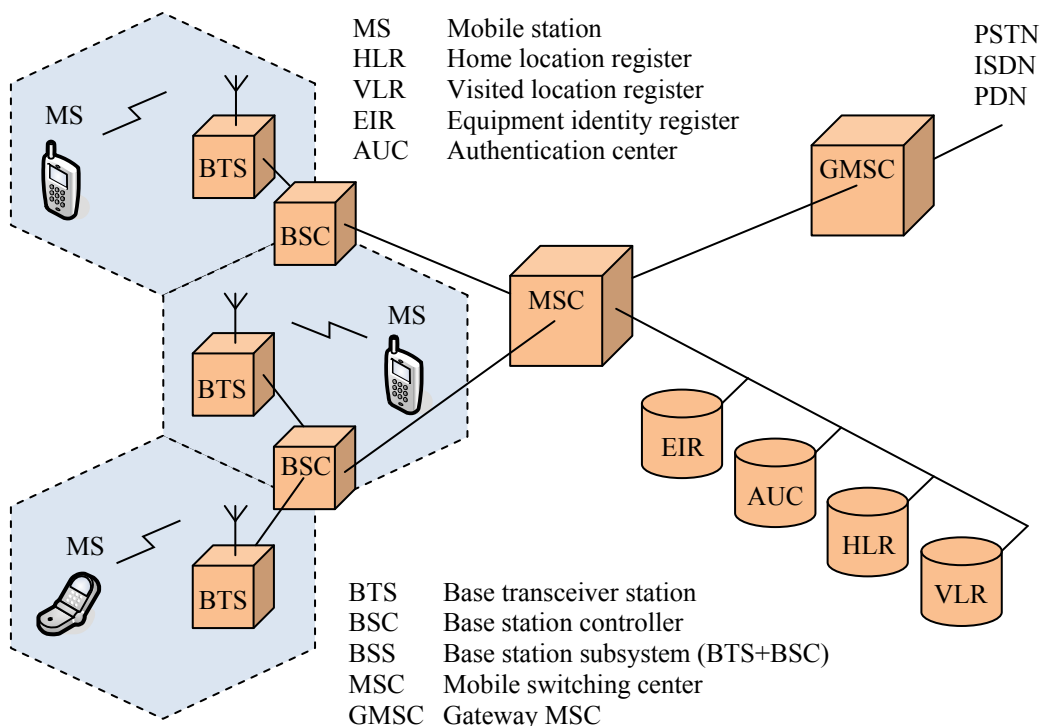
2.3.4 Technologie GSM

V roce 1982 Conference of European Posts and Telegraphs založilo skupinu (francouzsky „Groupe Spécial Mobile“). Název systému pochází právě ze jména této skupiny. Dnes se zkratka GSM vysvětluje jako (Global System for Mobile communication), což je globální systém pro mobilní komunikaci. Od svých předchůdců se GSM liší, protože signální i hovorové kanály jsou digitální, jedná se tedy o druhou generaci systému mobilních telefonů. GSM je otevřený standard, který vyvíjí 3GPP (Projekt partnerství třetí generace).

GSM tvoří celulární síť a mobilní telefony se k ní připojují hledáním buněk v bezprostřední blízkosti. Tyto sítě operují ve čtyřech různých kmitočtových rozsazích: 850, 900, 1800 a 1900 MHz. U nás se využívá pásma 900 a 1800 MHz, zbylé využívají např. některé země v Americe.

Celulární síť je uspořádání se šestihrannými buňkami, které v uspořádání připomínají „plástve medu“. Těmito buňkami jsme schopni pokrýt libovolně velké území a lze si vystačit jen se třemi druhy těchto buněk, přičemž každá buňka využívá jiný rozsah frekvencí. V každé buňce je počet hovorů omezen podle toho, kolik frekvencí má daná buňka k dispozici. Pokud je potřeba zvýšit počet souběžných hovorů, musí být tato síť buněk hustější. Každá buňka má ve svém centru celulární sítě základnovou stanici, která je označována jako BS (Base station), často nazývaná také jako BTS (Base Transceiver Station), viz obr. 7. Tato stanice komunikuje s mobilními telefony, které jsou uvnitř dané buňky. Nemusí se nutně jednat o mobilní telefony, ale mohou to být různé komunikační GSM terminály, moduly apod. BTS stanice komunikují s těmito zařízeními na frekvenci, kterou má buňka přidělenou. Pokud se uživatel s mobilním zařízením (telefonem) vzdálí od buňky a přejde do jiné buňky, pak si základnové stanice hovor předají, jedná se o tzv. handover. Tyto základnové stanice musí být mezi sebou propojeny a společně také řízeny. Obvykle několik základnových stanic sdílí společnou BSC (Base Station Controller), neboli řídicí jednotku. Tato celá soustava všech základnových stanic je přes řídicí stanice propojena s centrální ústřednou MSC (Mobile Services Switching Centre), která slouží pro směrování hovorů k jejich příjemcům. HLR (Home Location Register) slouží pro evidenci mobilních zařízení (telefonů), v které buňce se momentálně nachází, protože mohou být neustále v pohybu. Je to databáze pro ukládání jejich pozic. Další registry jako EIR (Equipment Identity Register), AuC (Authentication Centre) a VLR (Visitor Location

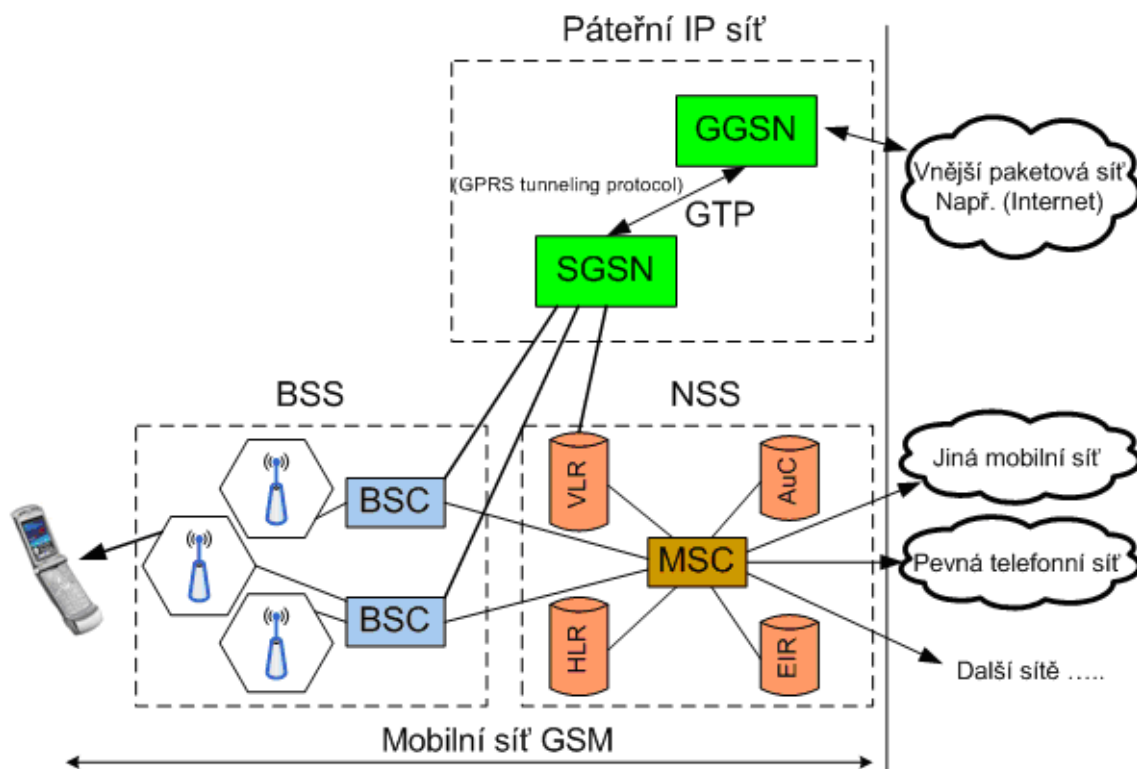
Register) slouží k evidenci vlastních uživatelů sítě a také návštěvníků sítě (v rámci roamingu), [Velický 2002].



Obr. 7 Blokové schéma sítě GSM s popisem jednotlivých stanic

GSM síť (celulární systém GSM) lze tedy rozdělit do čtyř základních částí:

- Mobilní uživatelská stanice (MS) – podle specifikace GSM je mobilní stanice jednak vlastní mobilní přijímač/vysílač (mobilní telefon) a jednak je to modul SIM karty sloužící především k identifikaci uživatele do sítě GSM.
- Subsystem základnových stanic (BSS) – prostřednictvím rádiového rozhraní s ním komunikují mobilní stanice (MS).
- Síťový spojovací subsystem (NSS) – jedná se o systém, který pracuje podobně jako ústředna, ale má také další funkce, jako např. vyhledávání a propojování hovorů z pevné telefonní sítě přes BSS na mobilní stanici.
- Operační subsystem (OSS) – má na starost provoz a údržbu celé sítě GSM, tedy subsystemů NSS i BSS.
- Tyto části společně s rozšířením GSM sítě o datovou službu (přenos) GPRS můžeme vidět na obr. 8.



Obr. 8 Síť GSM, rozdělená na jednotlivé části s datovým přenosem GPRS

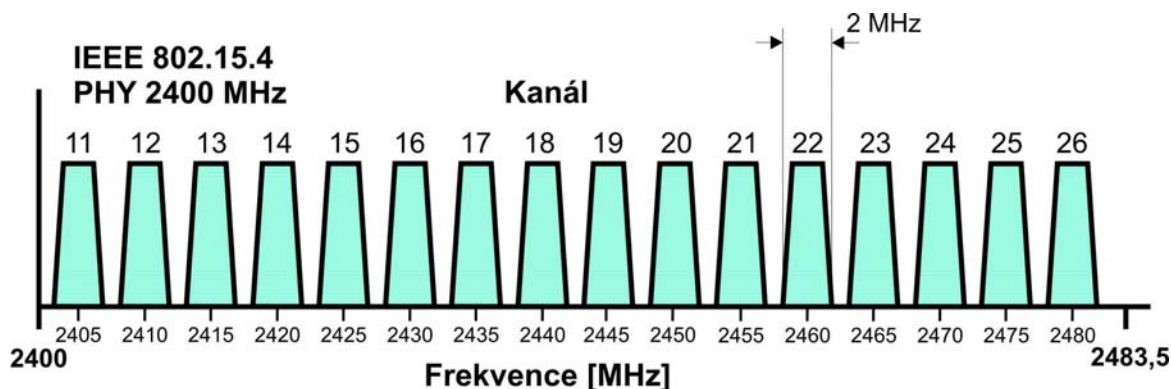
Bezdrátové telekomunikační systémy jsou rozděleny z hlediska generací. Vývoj začal od první generace, kde se jednalo o analogové radiotelefonní mobilní systémy, druhá generace, zde již byly systémy digitální. Generace 2,5 je vylepšení druhé generace. Patří sem velmi známé datové služby jako EDGE a GPRS. Další vývoj pak pokračuje na třetí generaci a dnes se hovoří o generaci čtvrté. Další informace o generacích GSM můžeme nalézt, viz [Současné mobilní komunikace 2009].

2.3.5 Technologie ZigBee a standard IEEE 802.15.4

Jedná se o poměrně nový nízkorychlostní standard bezdrátové komunikace, který má především široké uplatnění v oblasti řídicí techniky a automatizace. Tento mezinárodní komunikační standard je schválen národní organizací ZigBee Alliance a standardizační organizací IEEE. Standard nemá být konkurencí již zavedeným komunikačním standardům typu Bluetooth, ale má být jejich doplňkem a rozšířit tak možnosti a oblasti jejich nasazení. Tuto technologii vyvíjelo a nadále vyvíjí mezinárodní konsorcium firem ZigBee Alliance a mezi hlavní společnosti podílející se na přímém vývoji patří především společnost Freescale Semiconductor, Mitsubishi Electric, Honeywell, Motorola, Samsung, Philips a další. ZigBee standard je založený na využití fyzické a linkové vrstvy podle standardu označovaného jako IEEE 802.15.4 a poskytuje nízkopříkonovou a cenově nenákladnou bezdrátovou komunikaci pro řízení a monitorování systémů, např. v podobě akumulátorově napájených bezdrátových senzorů.

Architektura ZigBee

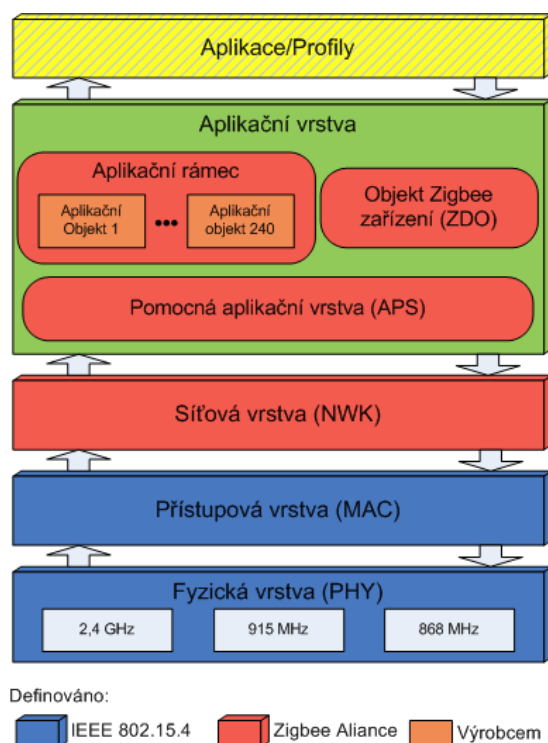
Standard ZigBee globálně využívá pásmo ISM 2,4 GHz s 16 kanály a přenosovou rychlostí 250 kbit/s. Pro Ameriku a Austrálii se využívá pásma 915 Mhz s 10 kanály a přenosovou rychlostí 40 kbit/s a pro Evropu pak pásmo 868 MHz s jedním kanálem a přenosovou rychlostí 20 kbit/s. Frekvenční rozsah a počet kanálů pro pásmo 2,4 GHz pro fyzickou vrstvu PHY standardu IEEE 802.15.4 můžeme vidět na obr. 9.



Obr. 9 Frekvenční rozsah a počet kanálů pro standard IEEE 802.15.4

ZigBee lze rovněž jako i jiné standardy popsat OSI modelem, viz obr. 10. Ten je možné rozdělit do tří základních bloků podle způsobu definice:

- IEEE 802.15.4 - definuje fyzickou (PHY) a MAC (linkovou) vrstvu OSI modelu.
- ZigBee Alliance - definuje síťovou (NWK) a vyšší vrstvy OSI modelu mimo aplikační.
- Uživatel - definuje uživatelské aplikace v aplikační vrstvě OSI modelu.



Obr. 10 OSI model technologie ZigBee, dle způsobu jeho definice

Jádro ZigBee je tvořeno na základě standardu volného propojovacího systému OSI (Open Systems Interconnection). Ten je složen ze 7 vrstev, ale standard 802.15.4 definuje pouze několik základních vrstev, které jsou nezbytné k dosažení kompatibility. Jedná se o nejnižší dvě vrstvy, fyzická vrstva PHY a spojová, která je rozdělena na dvě podvrstvy MAC a LLC. Vrstvu přístupu na médium MAC (Medium Access Control sub-layer) a horní vrstvu LLC (Logical Link Control).

Popis jednotlivých vrstev OSI modelu ZigBee

Spojová vrstva

Spodní vrstva MAC řídí způsob přístupu ke společné cestě PHY (rádiovému kanálu). K tomu se používá metoda mnohonásobného přístupu ke kanálu s nasloucháním nosné frekvence a s vyloučením kolizí CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Tato metoda předchází a vylučuje jakékoliv kolize. Komunikace probíhá tak, že uzel, který chce odeslat nějaká data nejdříve vyšle krátký paket, neboli žádost o povolení vysílání RTS (Request to Send) s údajem o velikosti celého datového paketu. Pokud příjemce zaslechne tuto žádost, odpoví paketem CTS (Clear to Send). Ostatní stanice ji zachytí a po dobu udanou v paketu nevysílají. Poté může žadatel odeslat hlavní datové pakety a vyčká na potvrzení příjemce (ACK), který kontroluje správnost přijatých dat podle kontrolního součtu CRC.

Vrstva LLC spravuje řízení logického okruhu a díky MAC je nezávislá na použitém přenosovém ZigBee prostředku.

Síťová vrstva

Síťová vrstva (NWK) zajišťuje připojování do sítě, tzn., hledá a udržuje cesty mezi zařízeními, provádí směrování rámců k příjemci, zabezpečení rámců, vytváří nové sítě a přiděluje adresy připojeným zařízením.

Aplikační vrstva

Aplikační vrstva (APL) se skládá z pomocné aplikační APS podvrstvy (Application Support Sub-layer), aplikačního rámce (Application framework), ZigBee objektů ZDO (ZigBee Device Object) a uživatelem definovaných aplikačních objektů. APS vrstva je zodpovědná za párování zařízení podle poskytovaných služeb a požadavků. To se provádí pomocí párovací (binding) tabulky. ZigBee objekt vyhledává nová zařízení, jejich poskytované služby, zodpovídá za bezpečnost (volí způsob zabezpečení, jako např. veřejné klíče, symetrické klíče apod.) a definuje roli jednotlivých zařízení v síti, jako koordinátor, koncové zařízení, směrovač. Uživatelem definované aplikační objekty zahrnují požadavky dané aplikace, podle definovaného ZigBee profilu.

Standard IEEE 802.15.4 definuje čtyři typy komunikačních rámců, které jsou využívány pro přenos užitečných datových informací a k režijním účelům, souvisejících se stavbou, správou a řízením sítě. Jedná se o:

Data Frame - Rámec, který slouží k přenosu užitečných datových informací.

Acknowledgement Frame - tento rámec je využitelný pouze na úrovni MAC. Slouží pro přenos potvrzovací informace a je vysílán v tzv. „mrtvém čase“ ihned po přenosu paketu.

MAC Command Frame - rámec sloužící k řízení a nastavení klientských zařízení v síti ZigBee a také k centralizovanému konfigurování.

Beacon Frame - tento rámec slouží k synchronizaci zařízení v síti, dále se používá při konfiguraci sítě v módu *beacon enable*. V tomto módu umožňuje uvést klientské zařízení do spánkového režimu, při kterém je obrovsky snížena spotřeba zařízení. Koncová stanice je probuzena v určitém časovém intervalu, který je stanoven na základě synchronizace mezi touto stanicí a centrální stanicí a poté jsou opět přenášena data.

Topologie ZigBee sítí

Standard IEEE 802.15.4 používá pro adresaci jednotlivých zařízení binární adresovací kódy, které mohou být buď dlouhé (64 bitové) nebo zkrácené (16 bitové). Adresa zkráceného adresovacího kódu umožňuje adresovat maximálně 65 535 zařízení v jedné síti. Každá síť je identifikována 16 bitovým identifikátorem PAN ID, který rozlišuje danou síť pro případ, kdy může být těchto sítí standardu IEEE 802.15.4 vytvořeno více, viz obr. 11. Síť, která má své unikátní PAN ID, je založena a spravována centrální stanicí (koordinátorem) a ostatní stanice jsou identifikovány jako koncové stanice. Každá koncová stanice může být ale identifikována podle plnění funkce jako směrovač nebo koncové zařízení (někdy též koncová stanice). Dle specifikace ZigBee se zařízení dělí na

zařízení s plnými funkcemi FFD (Full Functional Device) a zařízení s omezenými funkcemi RFD (Reduced Functionality Device). Každá síť tedy musí obsahovat nejméně jedno zařízení typu FFD (koordinátor sítě). Další zařízení ve funkci FFD mohou být směrovače a RFD jsou koncové zařízení (stanice). Více o ZigBee technologii, viz [HOUDA, L., AFIFI, H., DE SANTIS, C. 2007].

PAN ID zdroje 0/2 Byte	Adresa zdroje 0/2/8	PAN ID cíle 0/2	Adresa cíle 0/2/8
Adresové pole			

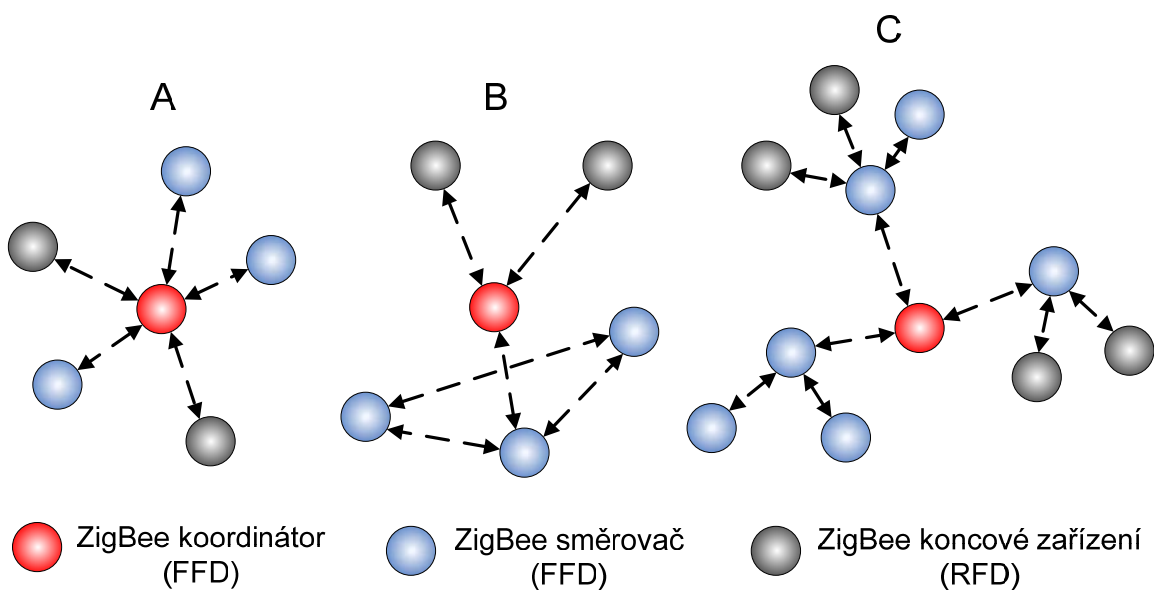
Obr. 11 Adresové pole MAC rámce

ZigBee standard definuje tři typy síťové topologie:

Topologie hvězda (star topology) - tato struktura sítě obsahuje jedno FFD zařízení, které plní funkci koordinátora sítě a ostatní zařízení jsou ve funkci koncových zařízení. Koordinátor je ve funkci přijímání, kromě toho kdy sám vysílá.

Topologie strom (tree topology) - u této topologie nemusí všechna zařízení komunikovat přímo s koordinátorem sítě a mohou využít jiné zařízení (směrovače) jako svého prostředníka. Tedy RFD zařízení připojená k FFD koordinátoru jsou u tohoto typu spojení nahrazena FFD zařízeními, ke kterým se mohou připojovat další FFD nebo RFD zařízení. Tímto se docílí mnohem větší vzdálenosti mezi koncovým zařízením a koordinátorem.

Topologie síť (mesh topology) - tato topologie kombinuje vlastnosti topologií strom a hvězda. Umožňuje sestavit síť libovolným způsobem, proto je velmi často používána.



Obr. 12 Topologie ZigBee sítě typu a) hvězda (star), b) síť (mesh), c) strom

3 Cíle doktorské disertační práce

Disertační práce se zaměřuje do oblasti bezdrátových technologií s cílem nasadit bezdrátové řešení do přímého aplikačního použití. Cíle disertační práce lze rozčlenit do následujících dílčích částí:

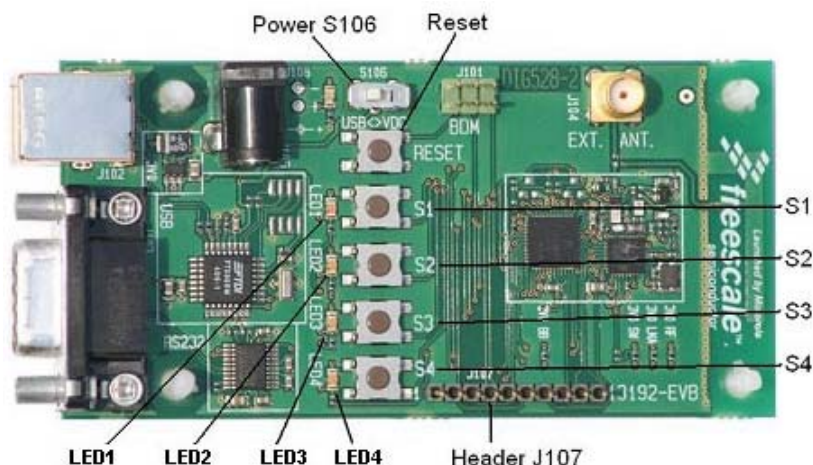
- Rozbor současných bezdrátových technologií, zaměření na trendy v oblasti bezdrátové komunikace s důrazem na ZigBee technologii.
- Analýza bezdrátových modulů, vývojových kitů a softwarové podpory pro možnosti tvorby distribuovaných senzorových sítí a úloh bezdrátového řešení.
- Vytvoření návrhu aplikace senzorové sítě, úlohy pro bezdrátový přenos dat ze snímačů, definovat struktury sítě pro možnosti nasazení bezdrátové technologie, získávání a přenos dat mezi bezdrátovými moduly s ohledem na optimalizaci spotřeby napájecí energie modulů.
- Vytvoření návrhu aplikace pro začlenění bezdrátového řešení do řízeného procesu, ověřit možnosti navržené koncepce na reálném modelu s ohledem na možné zásahy do procesu a další možnosti napojení na nadřazenou síť.
- Ověření komunikace mezi jednotlivými bezdrátovými moduly a dílčími částmi navržených typových úloh.

4 Hardwarové a softwarové prostředky pro realizaci senzorových sítí

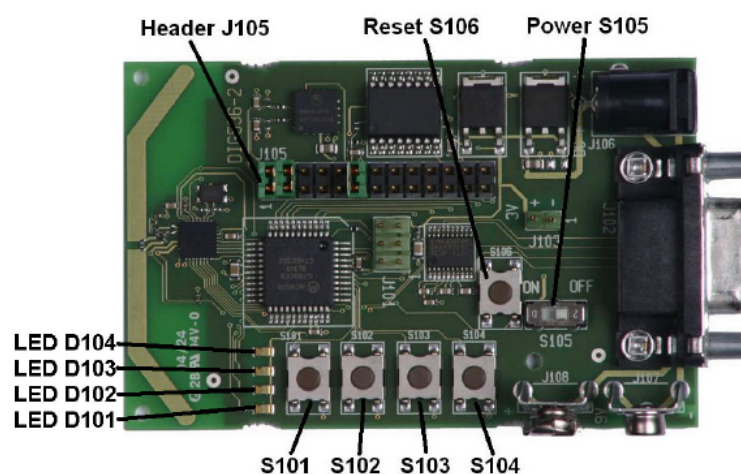
V dnešní době se na trhu nachází velké množství společností, které nabízí vývojové kity pro vývoj a tvorbu distribuovaných senzorových sítí. Většina těchto výrobců dodává k nabízenému hardwaru i patřičný software pro programování modulů, ovšem nenabízí již prostředí pro monitorování, sběr dat, vzdálenou konfiguraci bezdrátových modulů apod. Samozřejmě zde již záleží na dané aplikaci, pro kterou je bezdrátová síť vytvořena a především jaké veličiny jsou snímány. Vývojové kity zpravidla obsahují samotné bezdrátové moduly, ale také další rozšiřující rozhraní a desky, které bývají osazeny základními snímači, které pomáhají k návrhu požadovaných aplikací. Nejrozšířenější jsou snímače teploty, osvětlení, relativní vlhkosti, zrychlení apod. Protože vývojových kitů založených na standardu 802.15.4 je celá řada, budou dále v kapitolách popsány pouze hardwarové prostředky, kterými disponujeme na Katedře automatizační techniky a řízení se zaměřením na bezdrátové moduly od společnosti Jennic s označením JN5139. Tyto hardwarové prostředky jsou hlavním předmětem disertační práce.

4.1 Vývojový kit Freescale 13192EVK

Tento vývojový kit s označením 13192EVK od společnosti Freescale Semiconductor nabízí dva typy základních vývojových desek. Jedná se o desky s označením 13192-EVB a desky 13192-SARD, viz obr. 13 a obr. 14. Deska 13192-EVB je založena na standardu 802.15.4/ZigBee s komunikační jednotkou MC13192, viz tab. 4 a 8 bitovým mikroprocesorem MC9S08GT60. Desky poskytují připojení k PC pomocí standardní sériové linky RS232 nebo pomocí USB a nabízí další rozhraní pro vývoj a testování aplikací. Sem patří: 5 tlačítek včetně jednoho resetovacího, 4 LED diody, RF SMA konektor, piny pro připojení a programování paměti flash, napájecí piny, další piny pro přístup k mikroprocesoru a komunikační jednotce. Desky 13192-SARD jsou navíc doplněny akcelerometry s typovým označením MMA6261Q (pracující ve dvou osách) a MMA1260D (pracující v jedné ose). Tyto senzory jsou přímo vestavěny na desce a vytváří základní demonstrační úlohu pro měření zrychlení a náklonu desky, která je popisována v kapitole přehledu současného stavu.



Obr. 13 Vývojová deska 13192-EVB [Evaluation kit 13192EVK 2010]



Obr. 14 Vývojová deska 13192-SARD [Evaluation kit 13192EVK 2010]

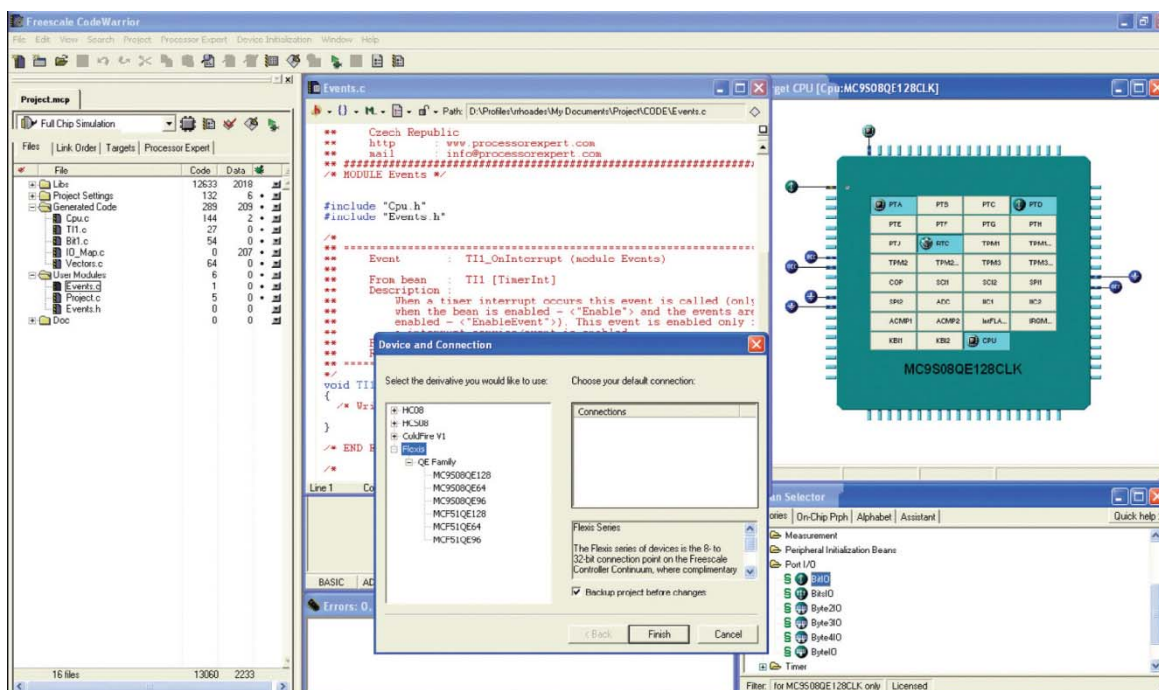
Mikroprocesorová jednotka MC9S08GT60 patří do rodiny HCS08 mikrokontrolerů, které se vyznačují velmi nízkou spotřebou elektrické energie. Mikroprocesor nabízí dvě sériové komunikační rozhraní SCI, komunikační rozhraní SPI pro připojení periferních obvodů, 8 kanálové A/D převodníky s rozlišením 10 bitů, více než 39 konfigurovatelných GPIO (General Purpose Input/Output), čítače a časovače s rozlišením 16 bitů, až 60 kB flash paměť a až 4 kB paměť RAM.

Tab. 4 Parametry komunikační jednotky modulů 13192-EVB a 13192-SARD

Komunikační jednotka MC13192	Popis
Frekvence vysílače	2,4 GHz
Přenosová rychlost	250 kbit/s
Komunikační rozhraní s mikroprocesorem MC9S08GT60	SPI
Výstupní výkon rádia	-27 dBm až +4 dBm

Spotřeba v režimu spánku	1 až 6 μ A
Spotřeba při vysílání	30 – 35 mA
Spotřeba při příjmu	37 – 42 mA
Dosah uvnitř budov	20 - 25 m
Venkovní dosah	100 - 150 m
Napájení	2 - 3,4 V

Pro vývoj aplikací a programování mikroprocesorové jednotky se využívá software CodeWarrior, viz obr. 15. Prostředí poskytuje podporu pro programování v jazyku Assembler a v jazyku C/C++ s patřičným překladačem, možnosti programování paměti flash, tvorbu optimalizovaného kódu se sledováním správnosti použité syntaxe, knihovny kompatibilní s normou ANSI C, simulaci pro mikroprocesor zahrnující mikroprocesorovou instrukční sadu, I/O, přerušeni a periferie.



Obr. 15 Programovací prostředí CodeWarrior

Velká nevýhoda tohoto vývojového kitu je vysoká cena, poměrně malá programovací paměť a použité 8 bitové mikroprocesory, které jsou v dnešní době již pro některé typy programovaných aplikací nedostačující.

4.2 Bezdrátové moduly Crossbow MICA2/MICAz

Bezdrátové moduly od společnosti Crossbow s označením MICA2 a MICAz se odlišují především ve frekvencích, na kterých moduly pracují. MICA2, viz obr. 16, používá frekvenční pásmo 868/916 MHz a moduly MICAz, viz obr. 17, pásmo 2,4 GHz. Bezdrátové moduly jsou vyráběny jako modulární systém, kde hlavní částí je komunikační

část, která se skládá z mikroprocesorové jednotky, paměti, přijímače/vysílače, konektoru pro připojení antény, antény, části napájení a 51 pinového konektoru, pomocí kterého lze připojit další periferie. Další částí je pak senzorová část, senzorové desky, které pomáhají k vývoji aplikací. Jsou nejčastěji osazeny senzory (zrychlení, termistory, fotoodpory apod.), kontaktními pájivými poli a rozšiřujícími sběrnicemi. Tab. 5 a tab. 6 popisuje základní parametry pro bezdrátové moduly MICA2 a MICAz.



Obr. 16 Bezdrátový modul MICA2

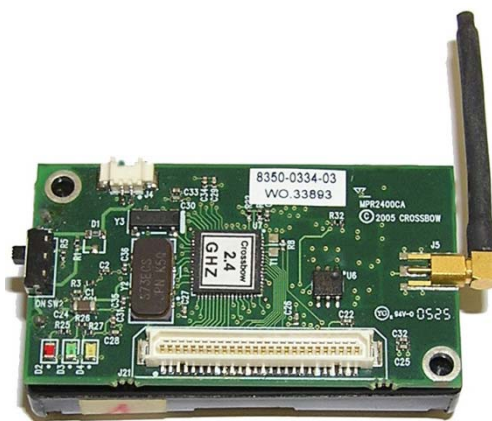
Tab. 5 Parametry bezdrátového modulu MICA2

Platforma MPR400CB	Popis
Frekvence vysílače	868/916 MHz
Přenosová rychlost	38,4 kb/s
Sériové komunikační rozhraní	UART
Velikost programové flash paměti	128 kB
Konfigurační paměť EEPROM	4kB
Výstupní výkon rádia	-20 dBm až +5 dBm
A/D převodník	10 bit – 8 kanálů
Spotřeba v aktivním módu	8 mA
Spotřeba v režimu spánku	< 15 μ A
Spotřeba při vysílání	27 mA
Spotřeba při příjmu	10 mA
Dosah uvnitř budov	do 25 m
Venkovní dosah	150 m
Napájení	2,7 - 3,3 V

Moduly MICA2 jsou označovány jako zařízení třetí generace, využívající platformu MPR400 s procesorem Atmel ATmega128L. Tento bezdrátový modul podporuje připojení všech senzorových desek jako MDA100, MTS300CA, MTS310CA, MTS300CB,

MTS310CB, MTS101CA apod. Pro připojení slouží 51 pinový konektor [Crossbow module Mica2 2010].

Moduly MICAz jsou založeny na standardu IEEE 802.15.4 a komunikují na frekvenci 2,4 GHz. Modul pracuje na platformě MPR2400CA a používá stejný procesor Atmel ATmega128L jako modul MICA2 [Crossbow module Micaz 2010].



Obr. 17 Bezdrátový modul MICAz

Tab. 6 Parametry bezdrátového modulu MICAz

Platforma MPR2400CA	Popis
Frekvence vysílače	2,4 GHz
Přenosová rychlost	250 kb/s
Sériové komunikační rozhraní	UART
Velikost programové flash paměti	128 kB
Konfigurační paměť EEPROM	4 kB
Výstupní výkon rádia	-24 dBm až 0 dBm
A/D převodník	10 bit – 8 kanálů
Spotřeba v aktivním módu	8 mA
Spotřeba v režimu spánku	< 15 μ A
Spotřeba při vysílání	27 mA
Spotřeba při příjmu	19,7 mA
Dosah uvnitř budov	20 - 30 m
Venkovní dosah	150 m
Napájení	2,7 - 3,3 V

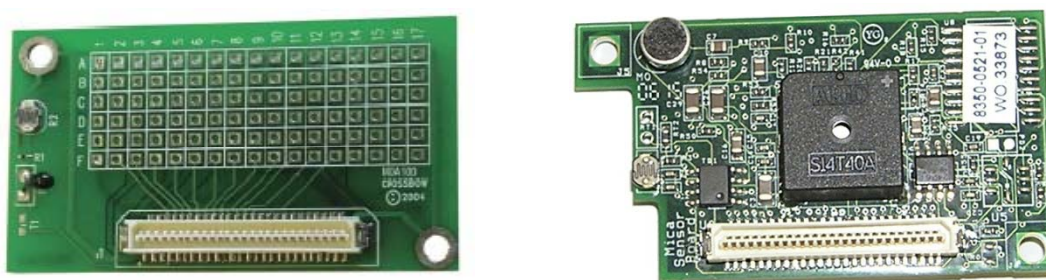
K vývojovému kitu patří také sběrné stanice, viz obr. 18, které jsou taktéž nazývány jako programovací moduly. Sběrné stanice tvoří základní bránu pro komunikaci s PC. Data z bezdrátových modulů (MICA2 nebo MICAz) jsou odesílána přímo nebo prostřednictvím dalších modulů do sběrné stanice, která odesílá naměřená data do PC, kde dochází k ukládání, popř. dalšímu zpracování naměřených dat. Pomocí této stanice můžeme také bezdrátové moduly programovat.



Obr. 18 Sběrná stanice MIB520 – vpravo s připojeným bezdrátovým modulem

Sběrná stanice MIB520 používá ke komunikaci s PC sériové rozhraní s dostupným USB portem. Při připojení dojde k vytvoření dvou virtuálních sériových portů, z nichž zpravidla port s nižším označením slouží ke sběru dat a s vyšším k programování modulů.

Poslední částí vývojového kitu jsou tzv. měřicí karty (desky) s označením MDA100CB a MTS300CA/310CA, viz obr. 19. MDA100CB je označení pro univerzální karty, které disponují již zabudovaným termistorem YSI 44006 a fotosenzorem Clainex CL94L. Deska nabízí možnost připojení dalších volitelných snímačů s normovaným výstupem 0 – 3 V. Komunikace probíhá po sběrnici I²C. Více o měřicí kartě MDA100CB viz [Crossbow MDA, MTS Sensor boards Users Manual 2010].

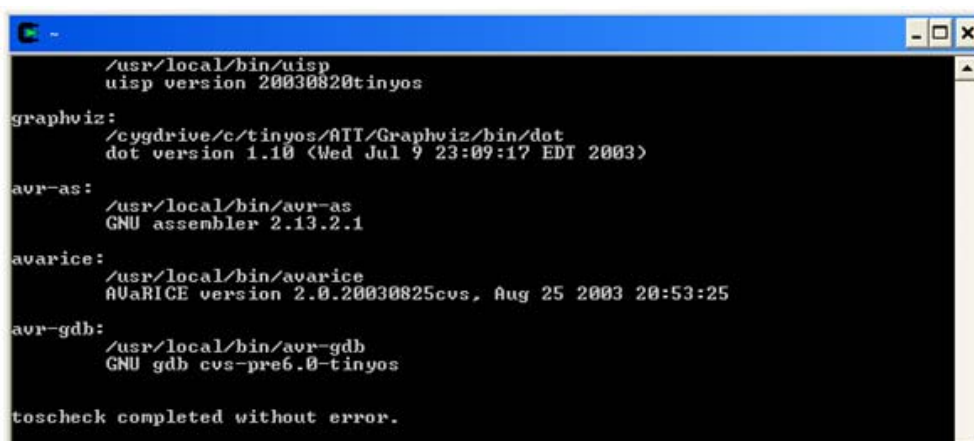


Obr. 19 Měřicí karty (desky), vlevo – MDA100CB, vpravo – MTS300CA

Karta MTS300CA je velmi podobná k předchozí měřicí kartě, odlišuje se pouze typem připojeného termistoru. Tady je modul osazen termistorem Panasonic ERT - J1VR103J, fotosenzorem Clainex CL94L a mikrofonom LM567 CMOS. U vyšších typových označení těchto karet bývá navíc snímač zrychlení s označením ADXL202JE, či dvouosý magnetometr Honeywell HMC1002.

Společnost Crossbow nabízí jako podporu pro nasazení senzorových sítí operační systém TinyOS. Jedná se o operační systém, který má komponentově založenou strukturu pro zrychlení implementace navržených algoritmů do bezdrátové sítě, kde jeho součástí je programovací jazyk nesC, simulační nástroj TOSSIM a další nástroje, které jsou užitečné k vývoji aplikací pro bezdrátové moduly. NesC je jazyk se syntaxí jazyka C a je účelně vyvinut pro bezdrátové senzorové sítě. Aplikace vytvořená v tomto jazyce je složená z jednotlivých komponent, přístupových souborů, které daná aplikace využívá ke své činnosti nebo naopak poskytuje data pro tyto komponenty. Jedná se o samostatné soubory obsahující algoritmy ovládající danou periférii. Pro jejich provázání je nutné, aby byl použitý soubor definován v záhlaví každého souboru. Zde je viditelná syntaxe jazyka C vycházející z definice hlavičkových souborů.

Velmi důležitou součástí operačního systému TinyOS je tzv. emulátor Cygwin, viz obr. 20, což je nástroj, který slouží pro komunikaci a programování bezdrátových modulů. Jedná se o emulátor systému Linux pod operačním systémem MS Windows a je součástí instalace balíčku TinyOS, více viz [TINYOS 2010].



```
C -
/usr/local/bin/uisp
uisp version 20030820tinyos

graphviz:
/cygdrive/c/tinyos/ATT/Graphviz/bin/dot
dot version 1.10 (Wed Jul 9 23:09:17 EDT 2003)

avr-as:
/usr/local/bin/avr-as
GNU assembler 2.13.2.1

avarice:
/usr/local/bin/avarice
AVaRICE version 2.0.20030825cvs, Aug 25 2003 20:53:25

avr-gdb:
/usr/local/bin/avr-gdb
GNU gdb cvs-pre6.0-tinyos

toscheck completed without error.
```

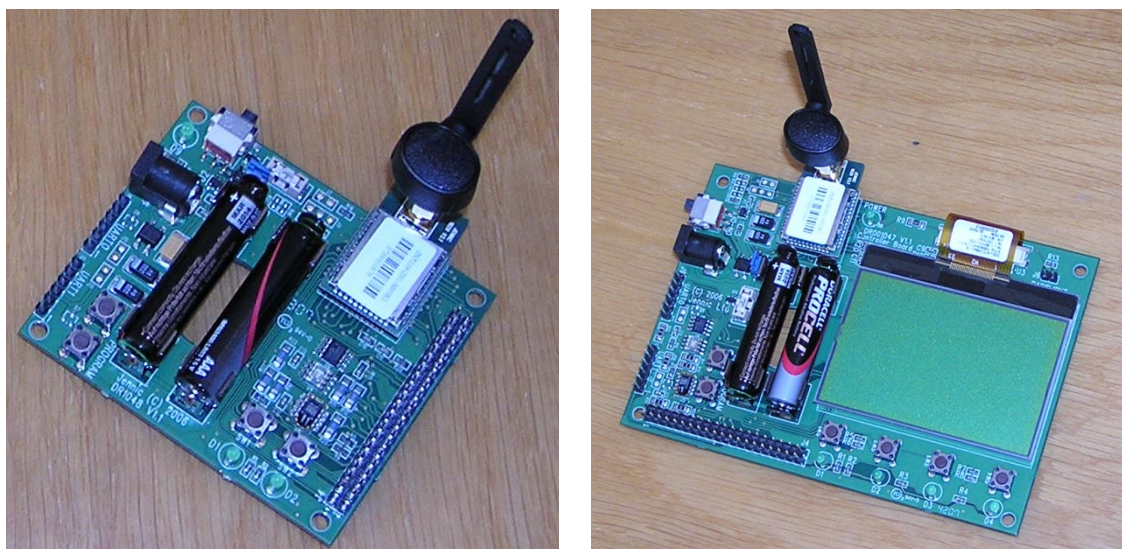
Obr. 20 Emulátor Cygwin pod operačním systémem MS Windows

Tento vývojový kit se liší oproti předešlému (od společnosti Freescale) nižší cenou a hlavně větší modularitou, kdy k bezdrátovým stanicím lze připojit podporované desky s již zabudovanými snímači, popř. pájivá pole s možností připojení dalších snímačů s požadovaným vstupním signálem na straně desky [Balšánek 2007, Smutný, Balšánek 2006].

Stejně jako u předchozích popisovaných bezdrátových modulů je i u těchto modulů použito 8 bitových mikroprocesorů (ATMEL AVR ATmega128L), což nemusí být dostačující pro některé typy aplikací. Navíc pokud vyžadujeme vyšší přenosovou rychlost, jsme odkázáni pouze na vývoj aplikací se ZigBee stackem. Zcela jiné varianty, co se síťového rozhraní a komunikačního protokolu týče, nabízí vývojový kit Jennic JN5139 - EK010.

5 Vývojový kit Jennic JN5139 – EK010

Společnost Jennic nabízí vývojový kit s typovým označením JN5139 – EK010. Tento vývojový kit včetně dalších samotných bezdrátových modulů byl použit pro realizaci senzorových bezdrátových sítí, pro účely testování algoritmů pro šetření elektrické energie, zpracování dat apod., včetně možnosti využití pro řízení technologických procesů. Celý vývojový kit se skládá z modulů s označením JN5139-Z01 a desek tvořící interface pro snadnější návrh a realizaci aplikací pro bezdrátové moduly. Vývojový kit obsahuje základnovou (řídící) desku a čtyři senzorové desky. Bezdrátové moduly pracují na frekvenci 2,4 GHz a jsou vybaveny SMA anténním konektorem či keramickou anténou. Moduly s SMA konektorem nabízí vyšší vysílací výkon a tedy větší dosah oproti modulům s keramickou anténou. Tomuto faktu také odpovídá vyšší proudový odběr při vysílání a přijímání dat. Řídící a senzorové desky disponují hardwarovým rozhraním dovolující snadnější návrh vyvíjených aplikací. Tyto desky vývojového kitu s připojeným bezdrátovým modulem můžeme vidět na. obr. 21.



Obr. 21 Senzorová a řídící deska s modulem JN5139

Senzorové desky poskytují následující hardwarové rozhraní pro vývoj aplikací:

- 2 LED světelné diody,
- 2 tlačítka,
- snímač teploty a relativní vlhkosti,
- snímač osvětlení,
- EEPROM paměť,
- rozhraní UART pro komunikaci s PC a pro programování modulů,
- rozšiřující porty pro další senzory.

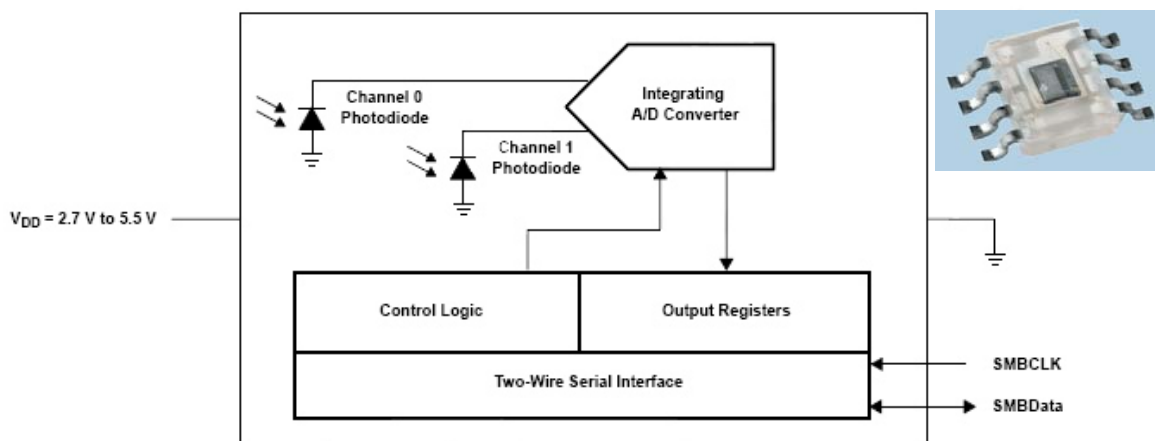
Řídicí deska navíc obsahuje LCD displej s rozlišením 128 x 64 pixelů a větší počet využitelných tlačítek a světelných diod.

Rozšiřující desky jsou osazeny usměrňovačem napětí a stabilizátorem, přičemž je možné je napájet externím napájecím zdrojem o velikosti stejnosměrného napětí 5 V až 7 V nebo střídavým napětím o velikosti 4,5 V až 6 V. Napájecí vstup je chráněn proti obrácené polaritě. Při volbě akumulátorového napájení je potřeba přepnout piny spínače J2, viz příloha I, na desce do příslušné polohy. Pro akumulátorové napájení je potřeba velikosti napětí 3 V, což odpovídá dvěma 1,5 V akumulátorům velikosti AAA.

5.1 Použité snímače na senzorových a řídicích deskách

Na senzorové a řídicí desce je umístěn snímač osvětlení, snímač teploty a relativní vlhkosti. Tyto snímače budou primárně využity pro měření veličin v definované bezdrátové senzorové síti.

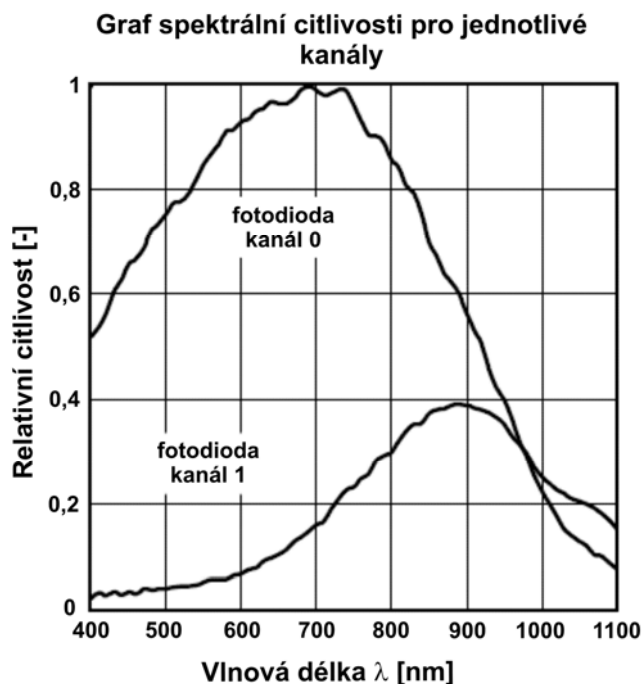
Snímač osvětlení TAOS TSL2550 konvertuje intenzitu osvětlení do digitálního signálu. Kombinuje dvě fotodiody, obsahuje A/D převodník a SMBus sériové rozhraní na samostatném CMOS integrovaném obvodu poskytující měření osvětlení skrz 12-bitový dynamický rozsah, viz obr. 22. Pro získání hodnot osvětlení, které jsou přibližné citlivosti lidského oka, jsou použity digitální výstupy dvou kanálů s používanými jednotkami Lux.



Obr. 22 Vnitřní struktura snímače osvětlení TAOS TSL 2550, vpravo je jeho podoba [TAOS TSL 2550 2009]

Tento snímač je navržen pro světelné zdroje s větší vlnovou délkou, kde jedna fotodioda (kanál 0) je citlivá na viditelné a infračervené světlo a druhá fotodioda (kanál 1) je primárně citlivá jen na infračervené světlo. A/D převodník převádí proudy z jednotlivých kanálů fotodiod na digitální signály. Nejdříve dochází k převodu kanálu 0 a následně kanálu 1. Doba trvání převodu jednoho kanálu je zhruba 400 ms a výsledek konverze je uložen do výstupního registru A/D převodníku. Digitální výstup kanálu 1 je využíván pro kompenzaci efektu infračervené složky okolního světla na kanálu 0 digitálního výstupu. Tyto digitální výstupy obou kanálů jsou použity pro získání

hodnoty, která se přibližuje citlivosti lidského oka v obvykle používaných jednotkách Lux. Graf spektrální citlivosti pro obě fotodiody můžeme vidět na obr. 23.



Obr. 23 Graf spektrální citlivosti pro jednotlivé kanály fotodiody snímače TSL 2550 [TAOS TSL 2550 2009]

Komunikace snímače s mikroprocesorem probíhá pomocí dvou vodičového sériového rozhraní. Snímač disponuje 8 – bitovým příkazovým registrem, jehož zápis a čtení je přes sběrnici SMBus. Snímač má navíc implementovaný tzv. „send byte“ protokol a „receive byte“ protokol, které dovolují zápis a čtení do připojeného zařízení. Struktura těchto rámců je vidět na obr. 24, kde rámce se liší v adresaci a bitu povolující zápis či čtení.

S	Adresové bity	WR/RD	A	Datový Byte	A	P
---	------------------	-------	---	----------------	---	---

S – startovací bit WR – bit povolující zápis RD – bit povolující čtení
A – ACK potvrzení zahájení relace P – stop bit

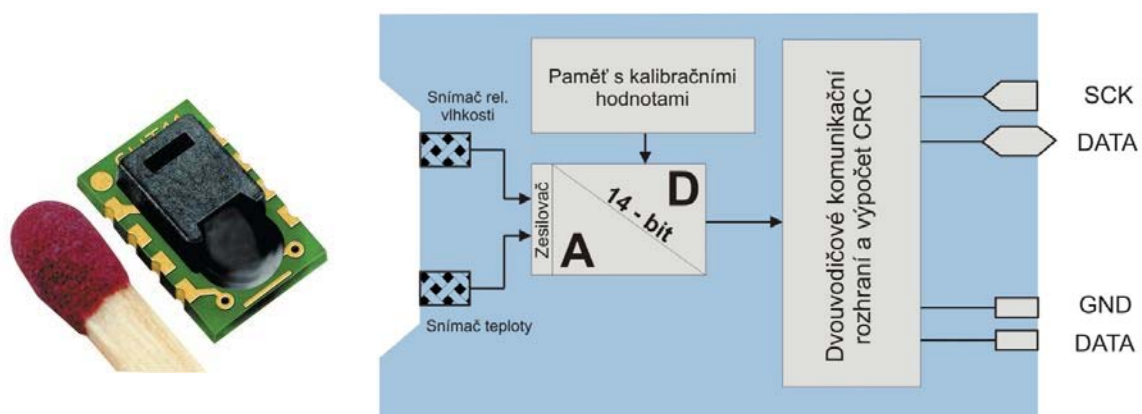
Obr. 24 Struktura komunikačního rámce snímače TSL 2550

Tento typ snímačů je velmi hojně používán v aplikacích, kde je potřeba měřit intenzitu okolního osvětlení pro možnosti řízení, např. podsvícení displejů u notebooků, PDA zařízení apod.

Snímač teploty a relativní vlhkosti Sensirion SHT11 je dalším snímačem, kterým disponují senzorové a řídicí desky vývojového kitu. Jedná se o inteligentní senzor, který snímá teplotu a relativní vlhkost na bázi kapacitního polymeru. Měřená teplota je využívána pro kompenzaci měřené relativní vlhkosti, kde oba snímače jsou připojeny na 14 – bitový A/D převodník. Získaná digitální data jsou následně upravena do formy, která

je vhodná pro přenos po dvou vodičové sběrnici. Komunikace je velmi podobná jako po sběrnici I²C.

Při měření neelektrických veličin bývá problémem kalibrace. Snímače obecně mají danou přesnost, ale jsou velmi často nelineární. Snímač SHT11 umožňuje měřit teplotu a relativní vlhkost bez nutnosti kalibrace, protože snímač obsahuje vnitřní kalibrační paměť, kde jsou uloženy kalibrační koeficienty sloužící k internímu přepočítání údajů ze senzorů.



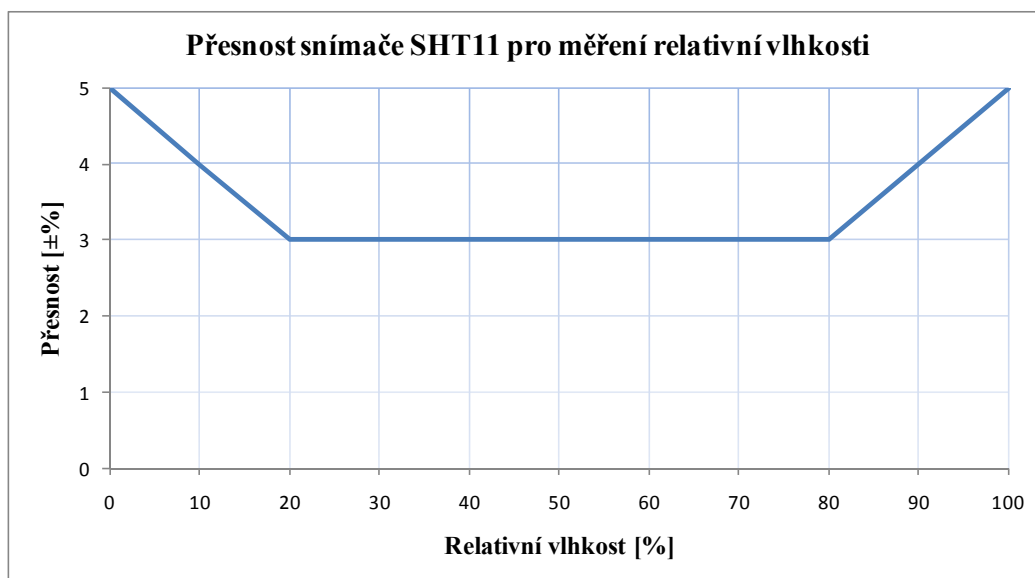
Obr. 25 Snímač teploty a relativní vlhkosti SHT11 a jeho blokový diagram

Mezi výhody tohoto snímače patří nejen kalibrace, ale také velmi nízká spotřeba, dlouhodobá stabilita, malé rozměry a automatický režim snížené spotřeby. Jeho charakteristické vlastnosti zobrazuje následující tab. 7.

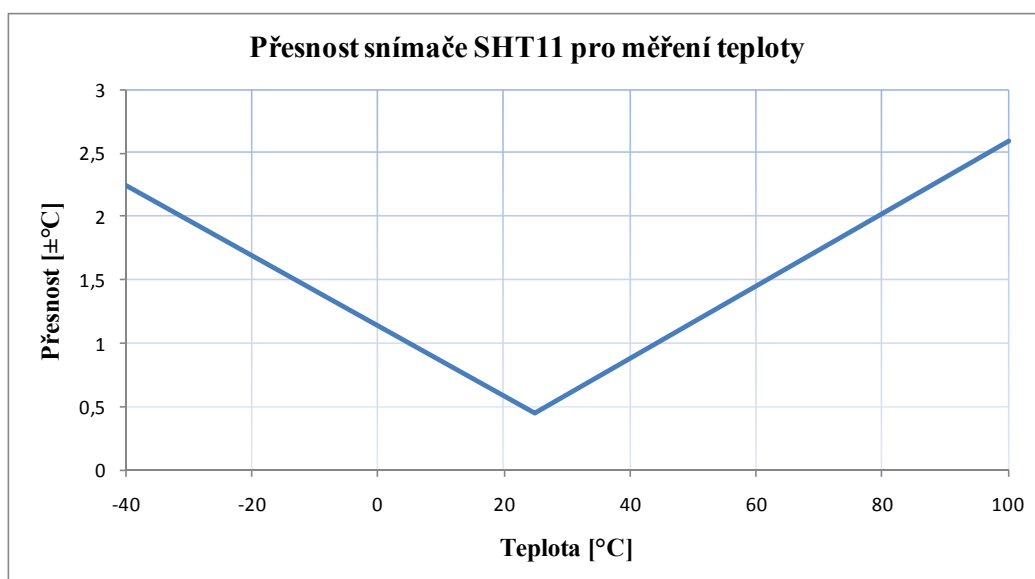
Tab. 7 Charakteristické vlastnosti snímače SHT11

SHT11	Měření vlhkosti	Měření teploty
Odchylka relativní vlhkosti [RV] a teploty při 25 °C	±3 %	±0,4 °C
Rozlišení	0,03 % RV	0,01 °C
Opakovatelnost	±0,1 % RV	±0,1 °C
Rozsah měření	0 – 100 % RV	-40 – 123,8 °C
Napájecí napětí	2,4 – 5,5 V	
Proudový odběr při měření	550 µA	
Proudový odběr v režimu sleep	0,3 µA	

Závislost přesnosti snímače vlhkosti SHT11 na relativní vlhkosti vyjádřené v procentech můžeme vidět na obr. 26. Na obr. 27 je uvedena závislost přesnosti snímače teploty na rozsahu měřené teploty.

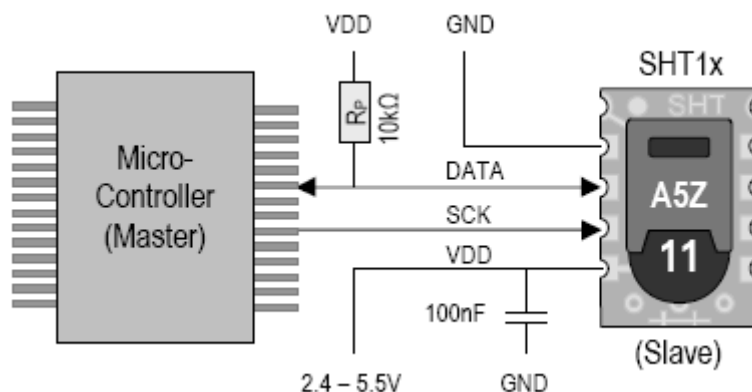


Obr. 26 Přesnost snímače relativní vlhkosti Sensirion SHT11



Obr. 27 Přesnost snímače teploty Sensirion SHT11

Senzor je možné přímo připojit k mikroprocesorové jednotce, kde komunikace se snímačem je typu master/slave. Vstup SCK hodinového signálu se používá k synchronizaci komunikace mezi mikroprocesorem a snímačem. Po datovém vodiči jsou přenášena obousměrně data, kde inicializace komunikace se provádí přivedením logické hodnoty 0 na datový vodič s následným nastavením stavu do logické hodnoty 1. Poté dochází k adresaci snímače a vyslání příkazu (příkaz pro vyhodnocení a zaslání informace o měřené vlhkosti či teplotě). Po vyslání potvrzujícího ACK paketu je hodnota na datovém vodiči nastavena na hodnotu logické úrovně 1 a procesor očekává dokončení měření nastavením datového vodiče do logické úrovně 0. Na obr. 28 je možné vidět propojení snímače s mikroprocesorem a průběh komunikace, viz [Sensirion SHT11 2009].



Obr. 28 Propojení snímače SHT11 s mikroprocesorem

Pro výpočet měřené teploty snímačem je nutné použít vztah umožňující přepočít hodnoty z A/D převodníku na teplotu ve stupních Celsia. Pro napájecí napětí senzoru 5 V a použitý 12 – bitový převodník platí rovnice s těmito přepočtovými konstantami:

$$T = d_1 + d_2 \cdot DM_T, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

$$T = -40,1 + 0,04 \cdot DM_T, \quad [^{\circ}\text{C}]$$

kde:

d_1, d_2 - konstanty převodu,

DM_T - 12 – bitový výsledek měření teploty.

Pro výpočet měřené relativní vlhkosti je potřeba použít následující vztah:

$$RV_{linear} = c_1 + c_2 \cdot DM_{RV} + c_3 \cdot DM_{RV}^2, \quad [\%] \quad (2)$$

$$RV_{linear} = -4 + 0,0405 \cdot DM_{RV} + (-2,8 \cdot 10^{-6}) \cdot DM_{RV}^2. \quad [\%]$$

Pro teploty, které se vzdalují teplotě 25 °C je potřeba použít teplotní kompenzaci pro správný výpočet relativní vlhkosti:

$$RV_{kompenz} = (T - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot DM_{RV}) + RV_{linear}, \quad [\%] \quad (3)$$

$$RV_{kompenz} = (T - 25) \cdot [0,01 + (8 \cdot 10^{-5}) \cdot DM_{RV}] + RV_{linear}, \quad [\%]$$

kde:

c_1, c_2, c_3, t_1, t_2 - konstanty převodu,

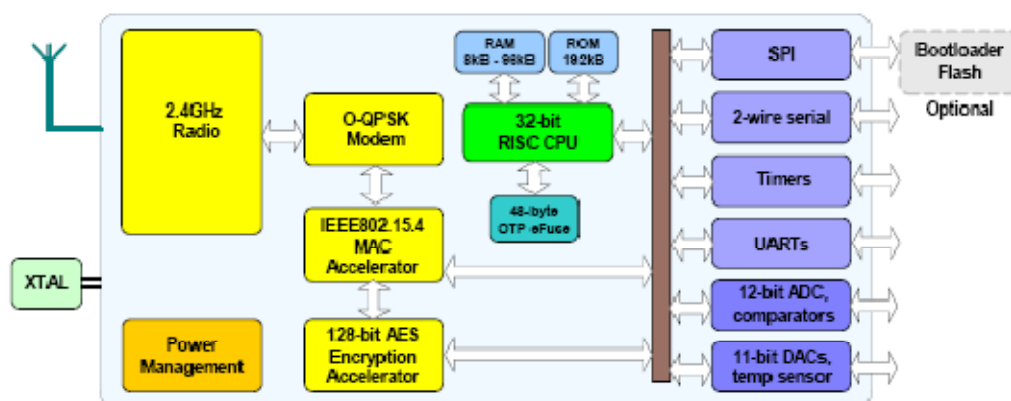
T - vypočtená teplota [$^{\circ}\text{C}$],

DM_{RV} - 12 – bitový výsledek měření relativní vlhkosti.

Tento typ senzoru je vhodný pro měření v průmyslových aplikacích, jako např. v automobilovém průmyslu či různých lékařských přístrojích, měření teploty při vytápění, v klimatizacích apod.

5.2 Bezdrátové moduly JN5139

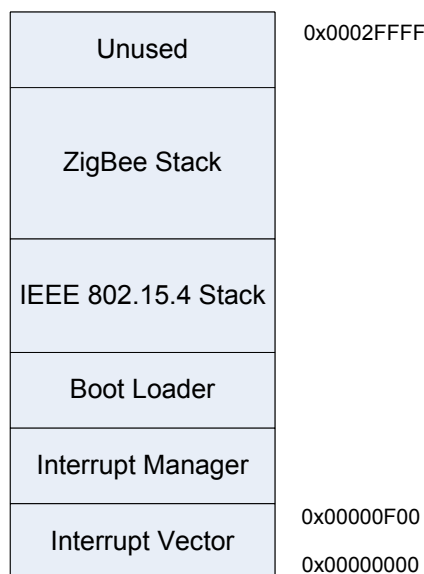
Základem bezdrátových modulů JN5139 jsou 32-bitové RISC mikroprocesory vyznačující se velmi nízkou spotřebou elektrické energie. Součástí mikroprocesoru, konkrétně mikroprocesoru s označením JN5139, který je základem bezdrátových modulů, je komunikační rozhraní podporující standard IEEE 802.15.4 pracující na frekvenci 2,4 GHz. Tyto mikroprocesory s bezdrátovým rozhraním jsou osazeny pamětí ROM o velikosti 192 kB, pamětí RAM s volitelnou velikostí od 8 kB do 96 kB, dvěma 11-bitovými D/A převodníky, 12-bitovým A/D převodníkem pracující v multiplexovém režimu se čtyřmi vstupy, 21 GPIO (General Purpose Input/Output), dvěma programovatelnými časovači, čítači a množstvím komunikačních periférií jako např. UART, který je využíván k programování mikroprocesoru, SPI, I²C apod. Blokové schéma mikroprocesoru JN5139 můžeme vidět na obr. 29.



Obr. 29 Blokové schéma mikroprocesoru JN5139 [Module JN5139, 2010]

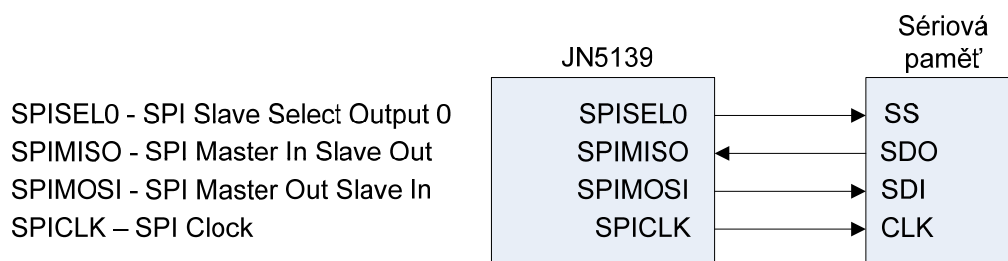
Pokud se zaměříme na paměťovou organizaci samotného mikroprocesoru, pak nelze přehlédnout paměť OTP eFuse o velikosti 48 Byte. Jedná se o jednorázově programovatelnou paměť, která je organizována jako 12 x 32-bitová slova. V této paměti je uložena identifikační adresa MAC ID, zbylá část paměti je vyhrazena pro uložení konfigurace a informací o modulu. Paměť ROM je přístupná v jednom cyklu zpracování mikroprocesorem a její obsah je dán pro různé verze mikroprocesorů s podporou rozdílných protokolů stack. Paměť ROM také obsahuje správce přerušení, tabulku vektoru přerušení a boot loader (zavaděč), který je zaveden mikroprocesorovou jednotkou po resetu zařízení, popř. při probuzení z režimu spánku nebo z módu tzv. hlubokého spánku. Tento zavaděč je navržený pro komunikaci se sériovou pamětí flash, která je připojená přes komunikační rozhraní SPI. Jeho úkolem je zavést uživatelskou aplikaci z flash paměti do paměti RAM a tento program spustit. Na obr. 30 můžeme vidět typickou organizaci paměti ROM modulu JN5139. RAM paměť je využívána jak pro kód samotného programu, tak

pro ukládání dat. Jako externí paměť je využívána již zmiňovaná paměť flash o velikosti 128 kB, kde 96 kB je využito pro samotný kód programu a zbytek kapacity o velikosti 32 kB (tzv. sektor 3) je dostupný pro ukládání dat (data z měření apod.).



Obr. 30 Obsah paměti ROM

Uživatel může využít externí paměť s rozhraním SPI. Tato paměť může sloužit jako úložiště kódu programu a dat pro zařízení v případě, že dojde k odpojení napájení modulu. Paměť může být připojena na piny bezdrátového modulu s označením SPISEL0, což jsou piny určené pro připojení k externí paměťové sběrnici, viz obr. 31.



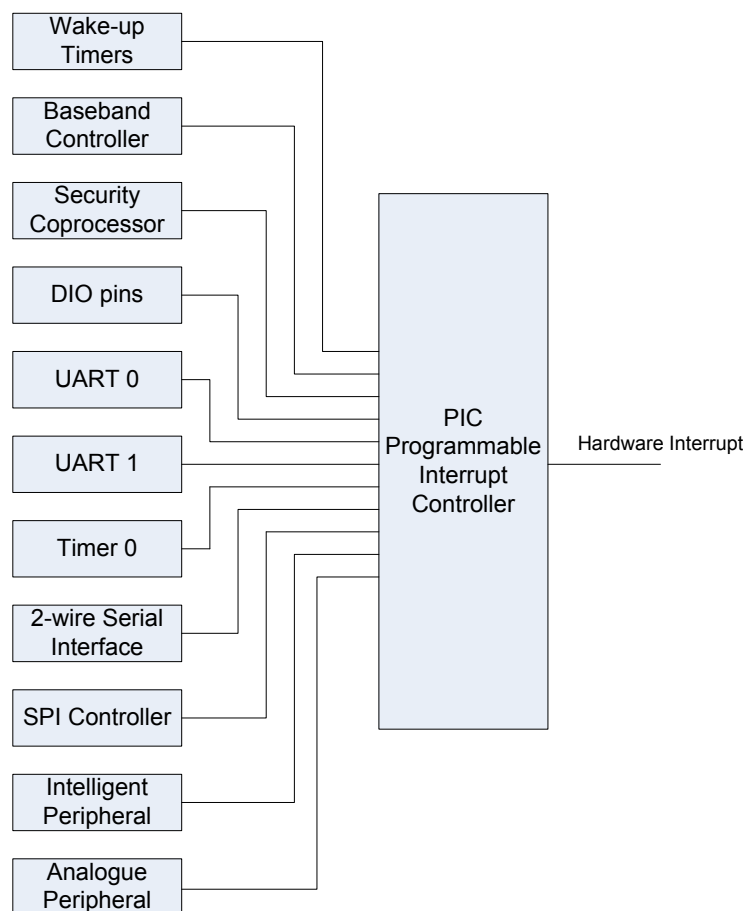
Obr. 31 Připojení externí paměti k modulu JN5139

V případě resetu modulu je softwarovým boot loaderem zkopírován obsah paměti do RAM paměti modulu. Typ externí paměti je závislý na komunikaci s boot loaderem.

5.2.1 Systém přerušení

Systém přerušení je u JN5139 označován jako hardwarově vektorový systém. Moduly mají několik zdrojů přerušení, kde některé přímo souvisejí s mikroprocesorem (CPU výjimky) a další, které jsou využívány hardwarem. Pokud nastane přerušení, pak CPU zastaví provádění stávajícího programu a načte čítač instrukcí s danou hardwarovou adresou, která je specifická pro dané přerušení. Obsluha přerušení nebo též přerušení služby je uložena v daném místě a je provedena v dalším cyklu CPU.

Hardwarová přerušení, která jsou generovaná z vysílače, analogových nebo digitálních periférií zařízení, DIO pinů apod. jsou individuálně maskovaná pomocí PIC (Programmable Interrupt Controller). Řízení přerušení je uvedeno v programových knihovnách periférií, viz [Jennic JN5139 module 2009]. Funkci programového řadiče přerušení můžeme vidět na obr. 32.

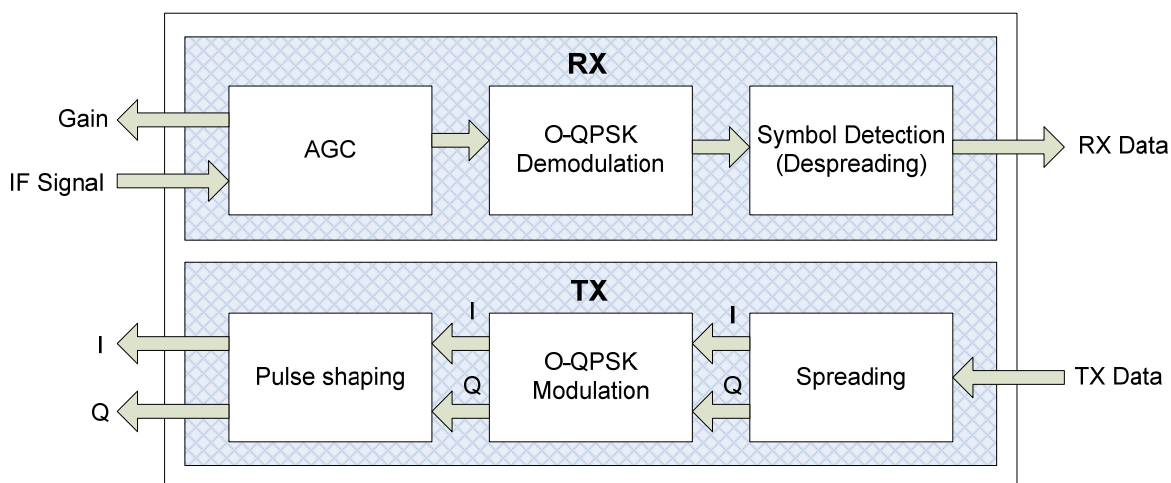


Obr. 32 Programový řadič přerušení

Přerušení se používá také k probuzení modulu ze spánkového režimu, kde periferie spolu s bezpečnostním koprocесorem a PIC jsou během spánku vypnuty. DIO přerušení a wake-up časovače, také přerušení analogového komparátoru jsou ale nadále napájeny, aby mohl být modul uveden zpět k činnosti.

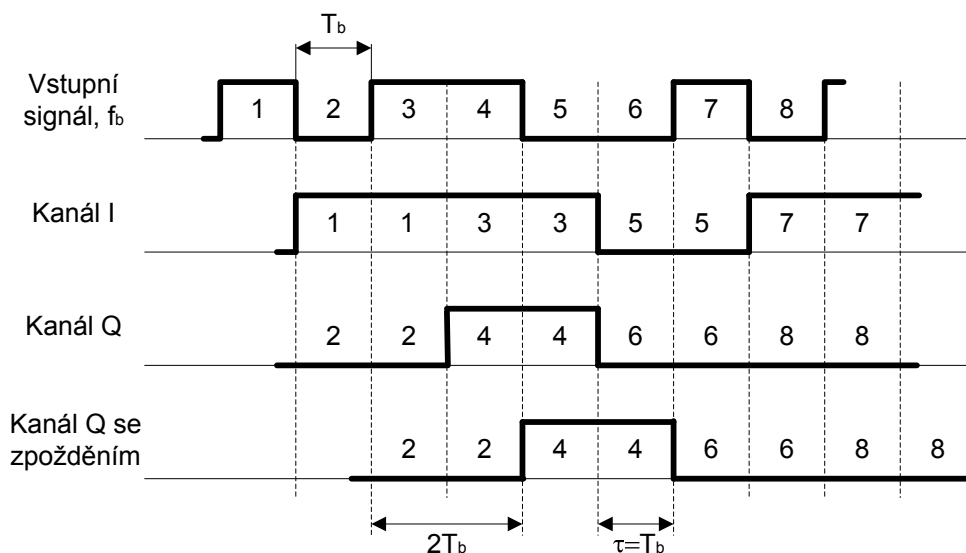
5.2.2 Funkce modemu

Modem vykonává všechny důležité modulace a funkce, které jsou vyžadovány pro digitální přenos a příjem dat v pásmu 2,4 GHz v souladu se standardem IEEE 802.15.4. Architekturu modemu můžeme vidět na obr. 33.



Obr. 33 Architektura modemu

Vysílání dat probíhá tak, že nejdříve dojde k rozdělení vstupního signálu do dvou větví I (In -phase) a Q (Quadrature), což se děje v obvodu nazývaném Spreading, též někdy může být uveden jako Splitter. Tímto se vytvoří v učitým časovém intervalu dvojice bitů. Protože je nutné respektovat princip kauzality, musí být signály v kanálech I a Q zpožděny minimálně o jednu bitovou periodu T_b za vstupním signálem. Ofsetová modulace O-QPSK se liší od QPSK především v tom, že u ní nemůže dojít ke změně stavů $11 \leftrightarrow 00$ nebo $01 \leftrightarrow 10$. Tento jev je zaručen zařazením zpožďovacího členu s dobou zpoždění $\tau = T_b$ do kanálu Q. Zpoždění Q signálu způsobí, že změna stavu signálu v jednom kanálu I nebo Q může nastat jen v polovině bitové periody signálu druhého kanálu. Časové průběhy signálu Q a I v modulátoru O-QPSK můžeme vidět na obr. 34. Více o tomto principu modulace se můžeme dozvědět, viz [Hanus, 2003]. Bitová perioda signálů v obou kanálech je stejná a je tedy rovna velikosti $2T_b$.



Obr. 34 Časový průběh vstupního signálu, signálu Q a I včetně zpoždění Q

Signály Q a I jsou následně upraveny přes tvarovač pulzů a převedeny na analogové napětí vhodné pro rádiové vysílání. Signály se vzduchem přenášejí prostřednictvím DSSS

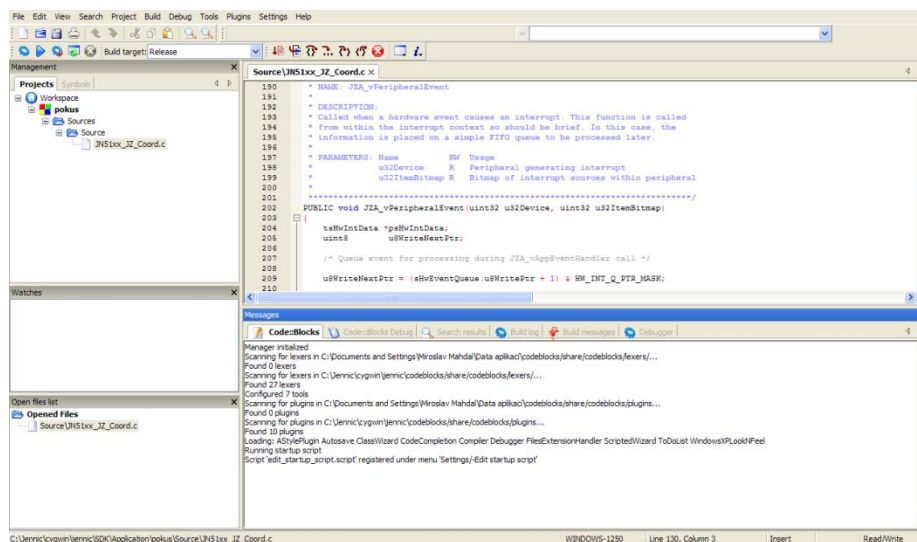
(Direct Sequence Spread Spectrum), což je podobná metoda jako v případě technologie Wi-Fi. Pro přístup na kanál se využívá metoda CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance and optional time slotting).

Příjem dat probíhá přes obvod AGC (Automatic Gain Control), což je obvod pro zesílení signálu, který sleduje úroveň přijímaného signálu a podle toho nastavuje zesílení zesilovače tak, aby přijímač měl optimální amplitudu signálu. Následně je signál demodulován za použití ofsetové O-QPSK demodulace s detekcí symbolů a společně se synchronizací se provádí pomocí přímé sekvenční techniky korelace, ve spojení s vyhledáváním úvodních částí přenášených rámců jako je SHR – synchronizace hlavičky.

5.3 Vývoj aplikací pro moduly JN5139

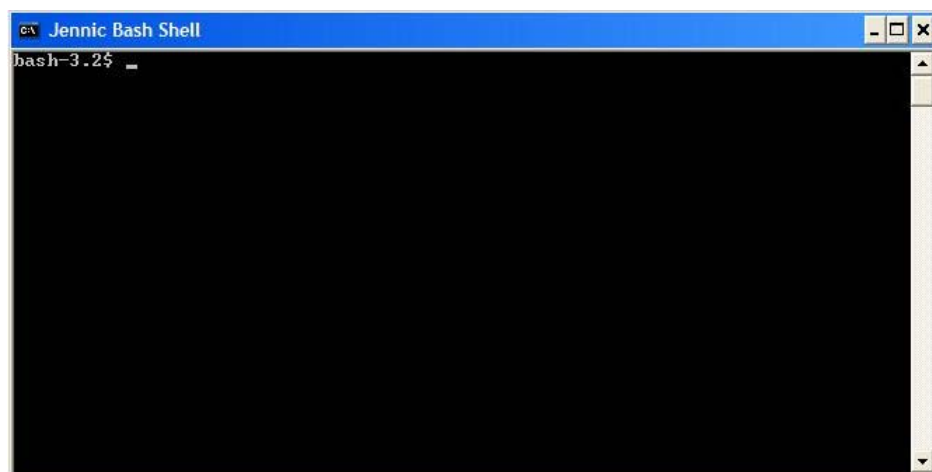
Pro vývoj aplikací do bezdrátových modulů lze využít dva druhy prostředí. Rozhraní příkazové řádky (CLI – Command Line Interface) a integrované vývojové prostředí (IDE - Integrated Development Environment). Obě tato rozhraní jsou součástí instalace SDK (Software Developer's Kit) Toolchain, který rovněž obsahuje programátor paměti flash. Abychom ale mohli vyvíjet aplikace pro moduly, je potřeba doinstalovat SDK Libraries, neboli knihovny, pomocí kterých můžeme vyvíjet aplikace pro různý protokol stack (Jennic IEEE 802.15.4, *Jenie/JenNet* network stack, ZigBee, apod.).

Integrované vývojové prostředí IDE - toto prostředí umožňuje vývoj aplikací v grafickém uživatelském prostředí integrující Jennic C knihovny obsahující C++ překladač (compiler) a sestavovací program (linker). Vývoj aplikačního kódu probíhá v kódových blocích programovaných v jazyce C++, viz obr. 35.



Obr. 35 Integrované vývojové prostředí IDE

Rozhraní příkazové řádky CLI - zde je možné vyvíjet aplikace za pomoci příkazové řádky v prostředí Cygwin, což je linuxový emulátor pro Windows, viz obr. 36.

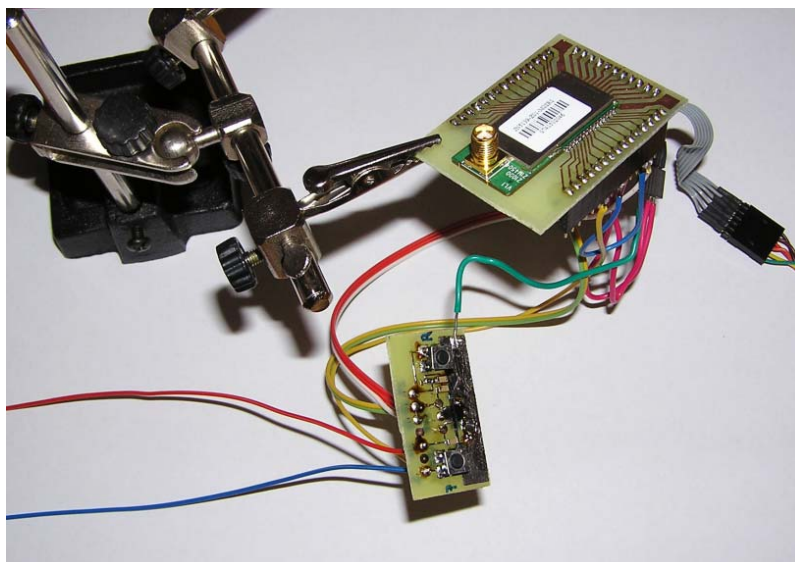


Obr. 36 Rozhraní příkazové řádky CLI

Protože vyvíjené programové kódy jsou poměrně rozsáhlé, bylo pro programování modulů vybráno prostředí IDE. Stejně jako v případě příkazové řádky musíme definovat, jaký protokol stack budeme využívat, pro jakou roli modulu (koordinátor, směrovač, koncové zařízení) a pro jaký modul (jeho typové označení) či vývojový kit aplikaci vyvíjíme. Po napsání kódu a jeho zkompileování můžeme nahrát vytvořenou aplikaci do modulu. K tomu nám slouží zmíněný programátor flash paměti, ve kterém máme možnost nejen nahrát zkompileovaný binární soubor do modulu, ale také možnosti jako zálohování sektoru 3, vymazání, nebo jeho obnovení. Před samotným programováním je nutná detekce bezdrátového modulu související s volbou komunikačního portu. Po nalezení modulu systémem je zobrazena verze flash paměti, označení modulu a MAC adresa modulu.

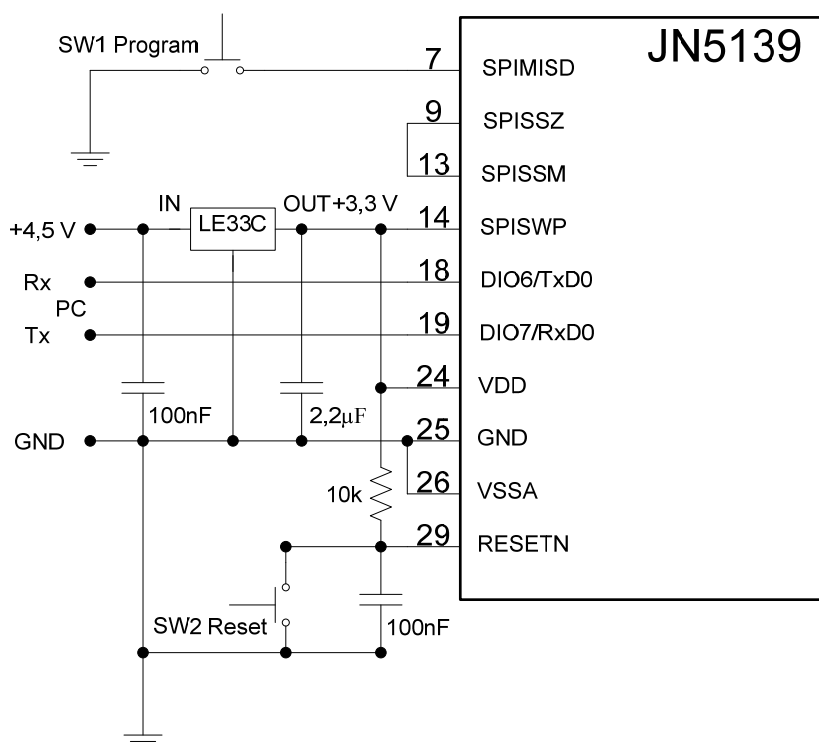
5.4 ***Tvorba programovací desky pro moduly JN5139***

V případě, že používáme řídicí nebo senzorové desky, je programování JN5139 modulů jednodušší, protože tyto desky mají hardwarové komponenty dovolující snadnější vývoj aplikací. Jedná se o resetovací a programovací tlačítka, připojení na komunikační rozhraní UART, LCD display nebo o vyvedený konektor pro snadnější připojení k modulu. Pokud ale chceme využívat bezdrátové moduly samostatně, jako např. v našem případě pro modul napájený z akumulátoru využívající jako zdroj energie sluneční záření, je nutné vytvořit rozhraní, které nám umožní přístup na jeho hardware a také možnost programování. Pro tyto potřeby jsem vytvořil jednoduchý programátor a desku plošného spoje, která dovoluje přístup na A/D, D/A převodníky, GPIO (General Purpose Input/Output) - piny pro konfiguraci digitálních vstupů a výstupů určené pro sběrnici I²C, komparátory, aplikační čítače/časovače apod, viz obr. 37.



Obr. 37 Bezdrátový modul připojen na rozšiřující rozhraní a připojen k desce programátoru

Bezdrátový modul byl připojen formou SMD na vytvořené rozhraní, kde bylo potřeba zajistit napájecí napětí 3,3 V pomocí stabilizátoru LE33C a možnost přístupu na resetovací a programovací tlačítka. Vytvořená deska s modulem nám již umožňuje snadný přístup ke všem pinům modulu. Schéma připojení modulu k programátoru včetně popisu pinů můžeme vidět na obr. 38.



Obr. 38 Schéma programátoru s připojeným modulem JN5139

Stabilizátor dodává výstupní napětí 3,3 V potřebné k napájení pinů bezdrátového modulu. Pro připojení k PC je možné využít USB programovací kabel bez řízení toku dat.

USB je na PC emulováno jako komunikační port COM s počátečním přiřazením čísla momentálně nevyužitého portu. Tlačítko SW1 Program slouží k programování modulu společně s resetovacím tlačítkem SW2 Reset. Stisknutím tlačítka SW1 Program a současným podržením tlačítka SW2 Reset dojde k uvedení modulu do programovacího režimu. Následně může být modul naprogramován binárním souborem.

Vývoj aplikací pro bezdrátové moduly JN5139 je závislý na používaném síťovém protokolu. Na naší katedře ATR 352 se zabýváme bezdrátovými sítěmi, které jsou postaveny především na ZigBee stack vrstvě. V disertační práci se soustředím na odlišnou stack síťovou vrstvu s názvem *JenNet*. *JenNet* tvoří alternativu k ZigBee a odlišuje se mimo jiné i možnostmi síťové topologie. Tato vrstva je vložena mezi vrstvu aplikační a vrstvu IEEE 802.15.4, která je dána standardem. V dalších kapitolách si popíšeme možnosti alternativního zdroje napájení pro moduly Jennic JN5139 a poté *JenNet* vrstvu, na které budou programovány veškeré vytvořené aplikace.

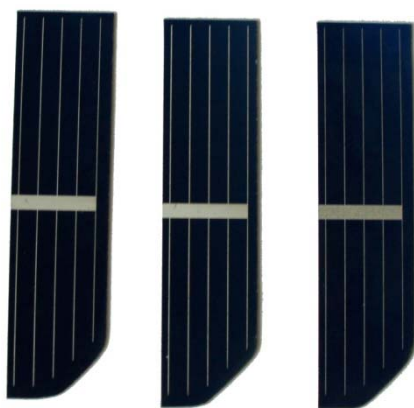
6 Alternativní zdroj napájení pro komunikační systém standardu IEEE 802.15.4

Napájení elektronických obvodů, které jsou mimo dosah elektrické napájecí sítě, je v současnosti poměrně složitý problém. V našem případě, pokud uvažujeme, že bezdrátová senzorová síť nebude omezena pouze na vnitřní prostory, jsme odkázáni na alternativní zdroje energie pro napájení inteligentních bezdrátových modulů. Pomineme-li čistě alternativní zdroje napájení, dodávající přímou energii do distribuční elektrické sítě, jsme odkázáni na kombinaci akumulátor – alternativní zdroj. Volba alternativního zdroje pro napájení bezdrátových modulů je poměrně jednoduchá. Větrná energie je po mechanické a velikostní stránce složitá a míst se stálou větrnou aktivitou je zvláště v městské oblasti velice málo. U vodní energie je situace ještě více komplikovaná. Zde jsme navíc omezeni lokalizací samotných modulů do blízkosti zdroje vodní energie. Využití přeměny tepelné energie na elektrickou naráží na zatím neřešitelné problémy v oblasti spínání extrémních proudů. Radioizotopové zdroje energie jsou na druhou stranu principiálně celkem jednoduché, ale v našich podmínkách je nelze využívat jako zdroje tepelné energie např. izotopy plutonia apod.

6.1 *Solární panel jako zdroj napájení bezdrátových modulů*

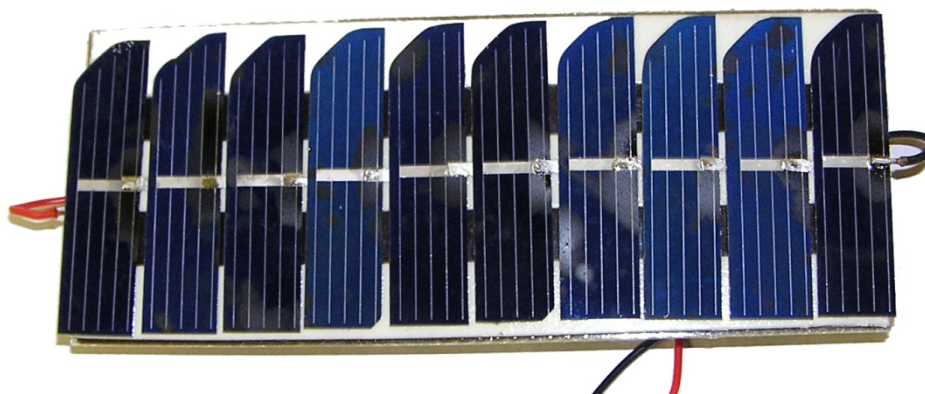
Z předchozího je patrné, že jedinou možností pro napájení mimo dosah elektrické sítě je sluneční energie. Slunečního světla je poměrně dost i v našich zeměpisných šířkách a to v jakémkoliv ročním období. Využití sluneční energie jako alternativního zdroje napájení v kombinaci s vhodným akumulátorem přináší dlouhou komunikační životnost modulu, prakticky omezenou pouze na životnost samotného akumulátoru, co se do počtu nabíjecích cyklů týče. S opakovaným nabíjením akumulátoru je potřeba počítat s postupnou ztrátou kapacity akumulátoru, ovšem doba, po kterou je schopen akumulátor zásobovat energií bezdrátový modul je výrazně delší, než kdybychom napájeli modul čistě z akumulátoru bez využití alternativního zdroje napájení. V obou případech je nutná pravidelná kontrola bezdrátových stanic, popř. software dispečinku sám informuje o podstatném úbytku napětí na akumulátoru bezdrátového modulu.

Aby bylo možné nabíjet akumulátor, potažmo napájet bezdrátový modul, je potřeba vytvořit panel osazený solárními články. Použité solární články jsou malých rozměrů (51,2 mm x 13 mm), viz obr. 39 a napětí, které je schopen dodat jeden článek, odpovídá 0,57 V při plném osvětlení článku. Jeden článek má definovaný zkratový proud 180 mA.



Obr. 39 Použité solární články pro napájení akumulátoru

Celý solární panel složený z 10-ti sériově řazených článků dodávající napětí zhruba 5,7 V při plném osvětlení, je možné vidět na obr. 40. Jednotlivé solární články byly spojovány speciální Cu páskou, která je pro tyto účely určena.



Obr. 40 Sestavený solární panel určený pro napájení bezdrátového modulu JN5139

6.2 ***Volba typu akumulátoru pro napájení bezdrátových modulů***

Výběr vhodného typu akumulátoru již tak jednoznačný není, jako to bylo v případě výběru alternativního zdroje energie. Vhodný typ se musí určit na základě pracovních podmínek daných snímačů. Energetická náročnost současných inteligentních snímačů je relativně nízká (pro napájení z elektrické sítě), ale současně poměrně vysoká z pohledu na dlouhodobou dobu provozu v externích podmínkách (čistě akumulátorový provoz). Testované moduly s komunikačním rozhraním IEEE 802.15.4 s typovým označením M02 (moduly osazeny SMA anténním konektorem) potřebují napájecí napětí minimálně 2,7 V. Proudový odběr je do 120 mA při vysílání a do 50 mA při příjmu. Tyto hodnoty nejsou nijak kritické a není to problém pro jakýkoliv typ současných akumulátorů.

Při práci v externích podmínkách se počítá s teplotním rozsahem v rozmezí $-20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$. Tady se již situace celkem mění. Provozní podmínky dnešních akumulátorů jsou velice rozdílné. Schopnost dodávat energii do zátěže se snižující se teplotou zmenšuje. Kritická hodnota je někde okolo -25°C , viz startování auta v mrazu. Z předešlé úvahy je

patrné, že akumulátor pracuje před svým vlastním limitem, ale problém se skrývá jinde. Schopnost přijímat elektrickou energii a přeměňovat ji na chemickou je podstatně více závislá na teplotě okolí. Například klasický článek typu Lithium ION se smí nabíjet v teplotním rozsahu $0^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$. Při teplotě nabíjení nižší se silně snižuje využitelná kapacita, životnost i konečné napětí článku.

Velikost článku hraje také svou roli. Dostupné olověné akumulátory jsou sice velice robustní z pohledu nabíjení i pracovních teplot, nicméně jejich vysoká hmotnost silně omezuje. Články typu NiCd, jedny z vůbec prvních komerčních akumulátorů, mají sice velmi nízký vnitřní odpor, ale také velice nízkou hustotu energie na kg své hmoty a nízké provozní napětí. U článků NiMH je situace o něco lepší, nicméně nízké provozní napětí je stále problém. Posledními kandidáty jsou akumulátory na bázi lithia. Je jich mnoho druhů lišících se svou hustotou energie na kg hmoty, provozním napětím i podmínkami. V poslední době se staly již běžně dostupnými a i metody nabíjení a monitorování jsou mnohem přístupnější. Lithium Iontový článek má charakteristické pracovní napětí 3,7 V, má nízkou hmotnost, vysokou hustotu energie na kg hmoty a velmi dobrý teplotní pracovní rozsah. Jejich snad jediná nevýhoda je v nutnosti pečlivě dodržovat nabíjecí napětí, popř. včas akumulátor odpojit a chránit ho tak před absolutním vybitím. Volba nakonec padla právě na cylindrický typ Li-ION akumulátoru, který můžeme vidět na obr. 41.



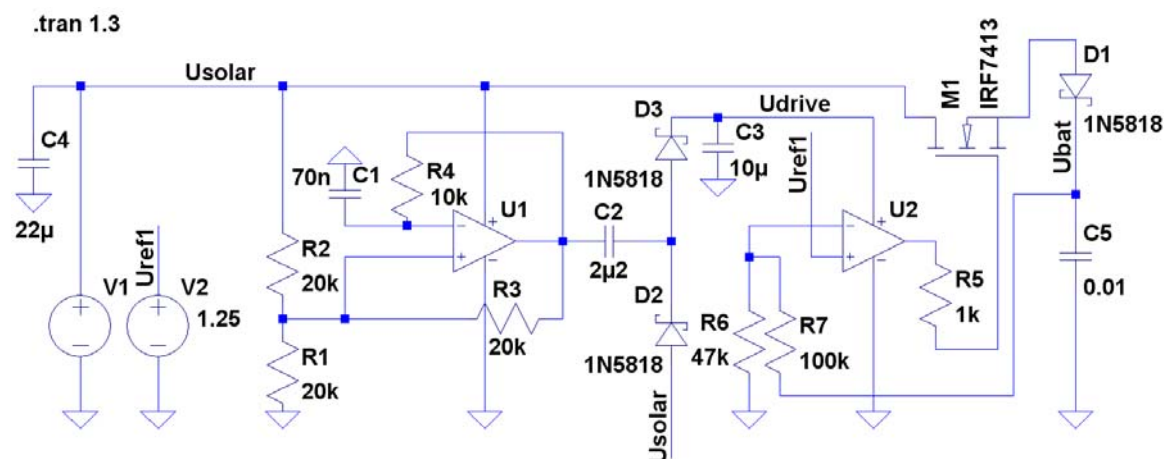
Obr. 41 Vybraný typ Li-ION akumulátoru

Akumulátor má kapacitu 900 mAh a svou velikostí odpovídá zhruba velikosti akumulátoru NiMH v provedení AAA. Volbou akumulátoru s vyšší kapacitou získáme delší čas, po který může být bezdrátový modul napájen, na druhou stranu musíme počítat s podstatně delší dobou nabíjení a většími rozměry.

6.3 Obvod pro nabíjení Li-ION akumulátoru ze solárního panelu

Aby bylo možné použít Lithiový akumulátor, bylo nutné vyvinout spolehlivý obvod pro jeho nabíjení. Na trhu je mnoho typů integrovaných obvodů, které se touto problematikou s úspěchem zabývají. Na začátku byl zvolen spolehlivý obvod od ON Semiconductor s typovým označením NCP1800. V laboratorních podmínkách vše

fungovalo bez problémů, ovšem po připojení na solární článek se situace obrátila. Problém byl v častém kolísání napájecího napětí v závislosti na slunečním svitu. Po několika minutách se spolehlivě napájecí modul „zasekl“ a odmítal dál pracovat. Bylo tedy nutné vyvinout vlastní obvod odolný proti těmto změnám. Základní schéma navrženého obvodu je na obr. 42.



Obr. 42 Schéma nabíjecího obvodu pro Li-ION akumulátor

Obvod lze rozdělit do dvou funkčních celků. První část zastoupená prvky R1, R2, R3, R4, C1, C2, D2, D3 a U1 tvoří nábojovou pumpu, tedy obvod zvyšující vstupní napětí na prakticky dvojnásobek původní hodnoty. Druhá část je regulátor, který reguluje napětí na akumulátoru (kondenzátor C5 reprezentuje akumulátor), aby nepřekročilo definovanou mez. Lithiové akumulátory jsou na přebíjení velice citlivé. I převýšení několika desítek milivoltů podstatně zkracuje dobu životnosti článku a může vést až k destruktivním změnám.

Zapojení je na první pohled poměrně složité. Také potřeba vyššího napětí není u těchto obvodů běžná. Má to však své opodstatnění. Regulátor omezující napětí na akumulátoru používá jako akční člen spínací tranzistor typu MOSFET – N. Bylo by sice možné použít běžný bipolární typ PNP, avšak má to jednu zásadní nevýhodu. Bipolární typy mají charakteristický úbytek napětí U_{CE} kolem 1,5 V. Pokud vezmeme v úvahu maximální nabíjecí napětí Li-ION akumulátoru 4,2 V, vyjde nám, že napětí zdroje musí být minimálně 5,7 V. Další problém se skrývá v tom, že solární panely dodávají nominální napětí pouze při definované minimální svítivosti. Takže počet sériově zapojených solárních článků (řezů) by vzrostl na minimálně 13 kusů. Účinnost obvodu při použití bipolárního tranzistoru by byla také podstatně nižší. Ztrátový výkon by byl roven:

$$P_{ZTR} = I_{NAB} \cdot U_{CE} \quad [W] \quad (4)$$

Při použití unipolárního typu tyto problémy odpadají. Úbytek napětí v propustném směru je možné vyčíslit podle vzorce:

$$U_F = R_{DS(on)} \cdot I_{NAB} \quad [V] \quad (5)$$

kde $R_{DS(on)}$ je hodnota odporu kanálu při otevřeném tranzistoru (řádově mΩ). Díky tomu je možné použít jen 10 sériově zapojených solárních článků.

Jediný problémem v zapojení nabíječky akumulátoru je v řízení tranzistoru MOSFET. Ten ke své funkci potřebuje řídicí napětí na vstupu GATE alespoň o 3 V vyšší, než napětí na vstupu SOURCE (tzn. alespoň 7,5 V). Proto je v obvodu nábojová pumpa, která se stará o potřebné řídicí napětí. Pumpa je složena z generátoru obdélníkového signálu o rozkmitu rovném napájecímu napětí. O to se stará speciální operační zesilovač MC33502, schopný pracovat již od napětí 1 V. Jedná se o RAIL TO RAIL verzi operačního zesilovače, tzn., že výstupní rozkmit je asi o 100 mV nižší než napájecí napětí. Pokud je na výstupu $U_1 = 0$ V, nabíjí se kondenzátor C2 téměř na hodnotu napájecího napětí přes Schottkyho diodu D2. Ve druhé polovině cyklu se na výstupu U_1 objeví kladné napájecí napětí. K němu se přičte hodnota napětí na kondenzátoru C2, takže výsledná hodnota napětí odpovídá vztahu:

$$U_{DRIVE} = U_{SOLAR} + U_{C2} \quad [V] \quad (6)$$

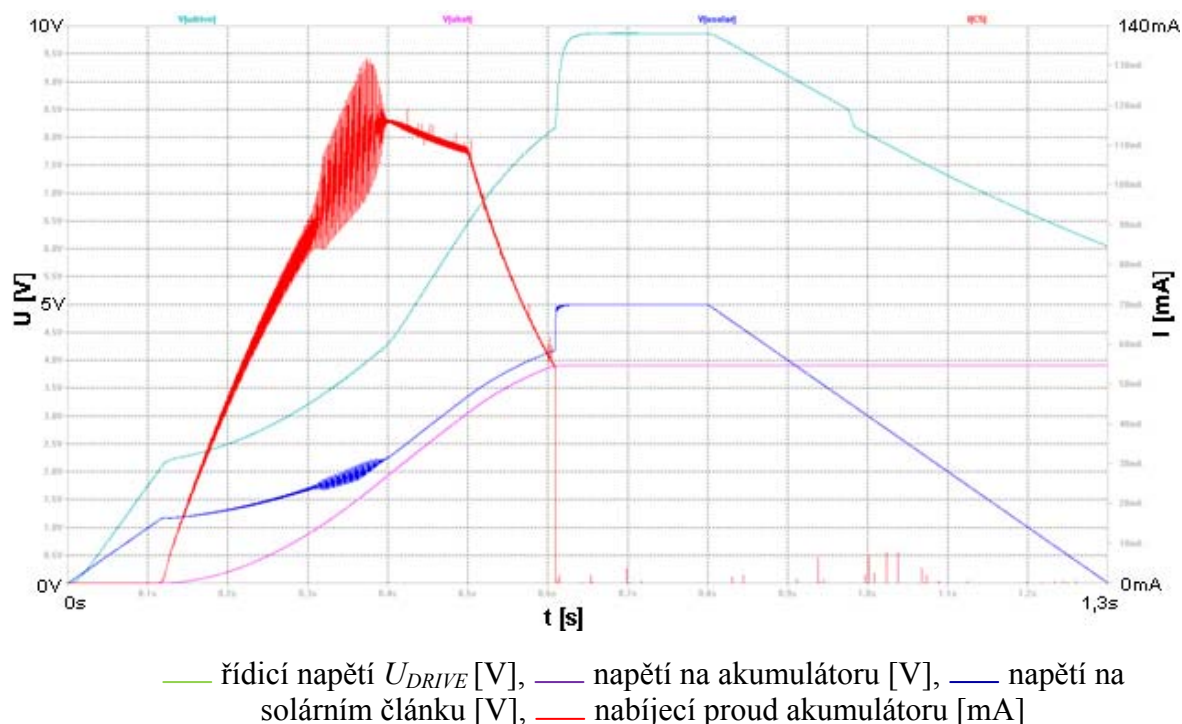
Pokud bychom uvažovali úbytky napětí na jednotlivých členech, výsledný vztah by vypadal takto:

$$U_{DRIVE} = U_{SOLAR} + U_{C2} - 2 \cdot U_{FD2,D3}, \quad [V] \quad (7)$$

a přenesená energie v jednom cyklu takto:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (\Delta U_{C2})^2 \quad [J] \quad (8)$$

Toto napětí U_{DRIVE} napájí druhý OZ s označením U2. Ten přímo řídí spínací MOSFET M1. Jedná se o klasický regulátor se zápornou zpětnou vazbou, tedy v podstatě stabilizátor napětí. Funkce regulátoru je dobře vidět na obr. 43 s průběhy důležitých veličin. Celý obvod byl nejdříve nasimulován v programu SwitcherCAD III, odladily se základní chyby a optimalizoval průběh nabíjení. V prvním kroku jsem se pokusil nasimulovat průběh napětí na solárním panelu. Zvolil jsem lineární růst napětí od 0 V do hodnoty 5 V, která po určitou dobu zůstala, s následným lineárním poklesem zpět na 0 V. Tento průběh byl zvolen, protože obsahuje jak problematickou úroveň zakázaného pásma OZ, tak stav s maximem výkonu. Na obr. 43 je vidět nárůst řídicího napětí U_{DRIVE} nad hodnotu napájecího napětí. Fialový průběh odpovídá napětí na akumulátoru, červený průběh pak nabíjecí proud. Modrá křivka zobrazuje napětí na solárním panelu. Od nastaveného průběhu se liší zavedením vnitřního odporu, který způsobil deformaci křivky v závislosti na odběru proudu.



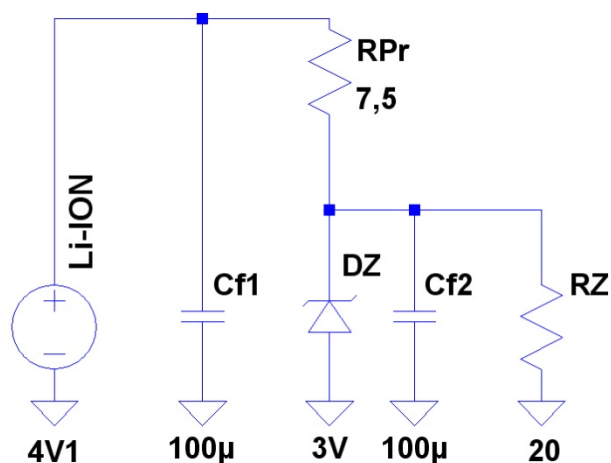
Obr. 43 Simulace průběhu kritických veličin regulátoru nabíjející akumulátor ze solárního článku.

Z důvodu zvýšení účinnosti a lepšího využití dopadajícího slunečního záření se zprvu jednoduchý regulátor změnil v podstatně na složitější, komplexnější zapojení. V určité oblasti (0,3s ~ 0,4s) se sice systém rozkmitává, ale důležité je, že se při zvýšení napětí akumulátoru opět vrací ke své funkci stabilizátoru napětí. Svou složitostí však vyvažuje dobrou účinností a spolehlivostí v kombinaci se solárními fotovoltaickými články a proměnlivým slunečním tokem. Desku plošného spoje kompletního regulátoru nabíjení pro akumulátor můžeme vidět v příloze II.

6.4 Snižující (BUCK) měnič napětí

Pro správnou funkci bezdrátových modulů Jennic JN5139 je třeba stabilizované napětí o velikosti od 2,7 V do 3,6 V. Pro napájení bezdrátových modulů bylo tedy zvoleno napětí 3 V, protože specifikace Jennic uvádí typické vlastnosti bezdrátových modulů právě pro tuto velikost napájecího napětí, viz [Jennic JN5139 module 2009]. Z Li-ION akumulátoru nabíjeného solárním panelem přes vytvořenou nabíjecí část máme ovšem k dispozici napětí odpovídající charakteristickým vlastnostem Li-ION akumulátorům. Napětí na akumulátoru kolísá v rozmezí 3 V, což je téměř vybitý stav a 4,2 V, což naznačuje plně nabitý akumulátor. Toto napětí je tedy třeba upravit. Je několik možností jak tohoto dosáhnout. Každá se liší svou účinností, náročností stavby, výstupním zvlněním apod. Cílem bylo navrhnout takové řešení, které by zaručilo stabilní výstup a vysokou účinnost, která je prioritou při napájení modulů z baterií či akumulátorů.

V první řadě bylo uvažováno nad klasickým lineárním stabilizátorem. Tento typ stabilizátoru je velice jednoduchý, v podstatě nemá výstupní zvlnění a neovlivňuje své okolí EMI (ElectroMagnetic Interference) rušením. Tyto výhody s sebou nesou jedinou nevýhodu, a tou je velice nízká účinnost. Schéma zapojení je na obr. 44.



Obr. 44 Lineární stabilizátor se Zenerovou diodou

Základními prvky stabilizátoru jsou zdroj napětí, předřadný odpor RPr, Zenerova dioda DZ a odpor zátěže RZ. Stabilizátor je navržen pro maximální proud 150 mA. Pokud je proud zátěží plných 150 mA, tak přes Zenerovu diodu neteče žádný proud. Při snížení výstupního proudu by nastalo zvýšení výstupního napětí, a tím by mohlo dojít k poruše. Proto je v obvodu zapojena Zenerova dioda, která se při dosažení určitého Zenerova napětí otevírá a spolu s předřadným odporem tvoří napěťový dělič. Nevýhodou je, že stabilizátor odebírá plný proud i při nulovém výstupním proudu. Přebytkový výkon se vyzáří ve formě tepla na Zenerově diodě. Energetická bilance by se dala vyjádřit např. takto:

$$P_{OUT} = U_{DZ} \cdot I_Z, \quad [W] \quad (9)$$

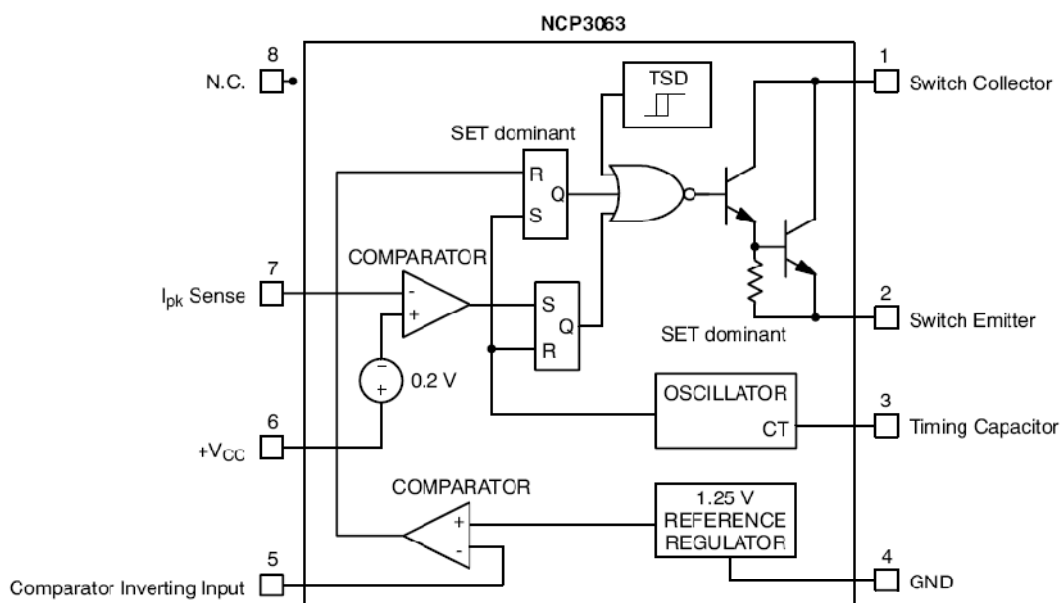
$$P_{IN} = \frac{(U_{Li-ION} - U_{DZ})}{R_{Pr}} \cdot U_{Li-ION} , \quad [W] \quad (10)$$

pak účinnost je dána:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} . \quad [\%] \quad (11)$$

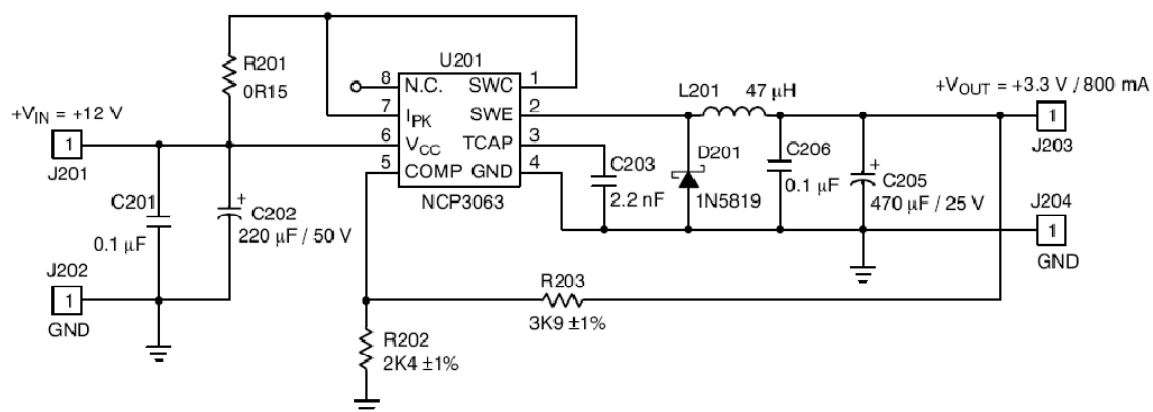
Při středním proudu zátěží 40 mA se účinnost pohybuje okolo 20 %, v maximum kolem 75 %. Tyto hodnoty nejsou nejhorší, nicméně jsou nízké a zbytečně se snižuje užitná kapacita akumulátoru a tím i doba provozu.

Opakem lineárního stabilizátoru je snižující měnič (BUCK). Toto zařízení je sice složitější koncepce, ale zato má podstatně vyšší účinnost než lineární stabilizátor. Tento typ stabilizátoru má na výstupu zvlnění, které vyplývá z principu jeho funkce. Toto zvlnění se pohybuje v řádu mV a je dáno principem funkce stabilizátoru. Není možné se ho zbavit úplně, jen jej minimalizovat do takové míry, kdy nám již nevadí. Základem měniče je integrovaný obvod od ON Semiconductor s typovým označením NCP3063. Jeho blokové schéma je na obr. 45. Jedná se o monolitický DC-DC měnič. Je vybaven vnitřním, teplotně kompenzovaným referenčním zdrojem napětí, komparátorem, oscilátorem a ovladačem pro výkonový spínací prvek. Základní parametry, viz [NCP3063 2010].



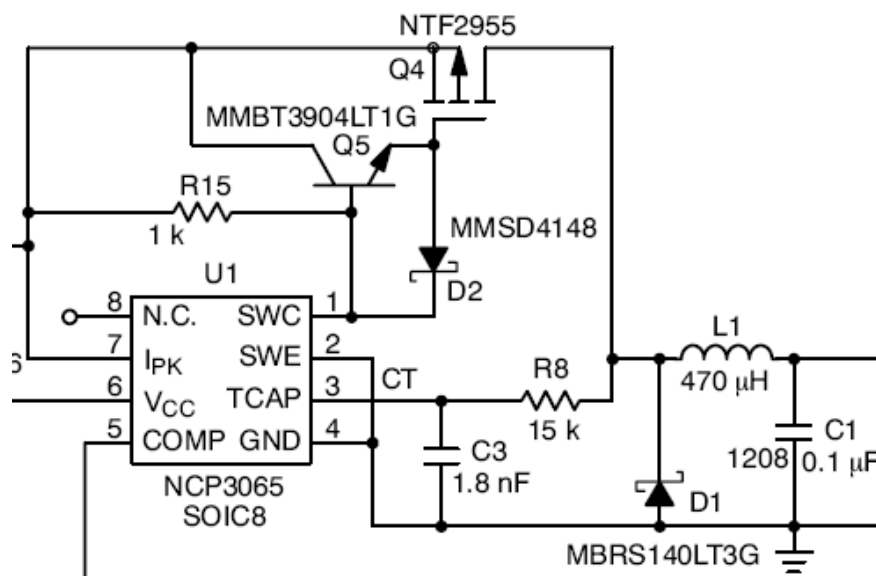
Obr. 45 Blokové schéma integrovaného obvodu NCP3063 [NCP3063 2010]

Obvod NCP3063 byl zapojen s několika úpravami podle doporučeného zapojení výrobce. Základní doporučené schéma pro snižující (BUCK) měnič s cívkou je možné vidět na obr. 46.



Obr. 46 Doporučené schéma zapojení pro obvod NCP3063 [NCP3063 2010]

V rámci úspory elektrické energie a zvýšení účinnosti byly na tomto základním doporučeném obvodu provedeny následující úpravy. Došlo k vyřazení vnitřního výkonového tranzistoru, který se nahradil výkonovým tranzistorem typu MOS-FET P. Unipolární tranzistory mají oproti klasickým bipolárním typům zásadní výhodu v tom, že nemají fixní úbytek napětí mezi kolektorem a emitorem (U_{CE}). Při sepnutí je úbytek mezi Drain a Source úměrný pouze odporu kanálu otevřeného tranzistoru (R_{DS-ON}) v řádu desítek mΩ. Modifikace základního schématu zapojení je vidět na obr. 47.

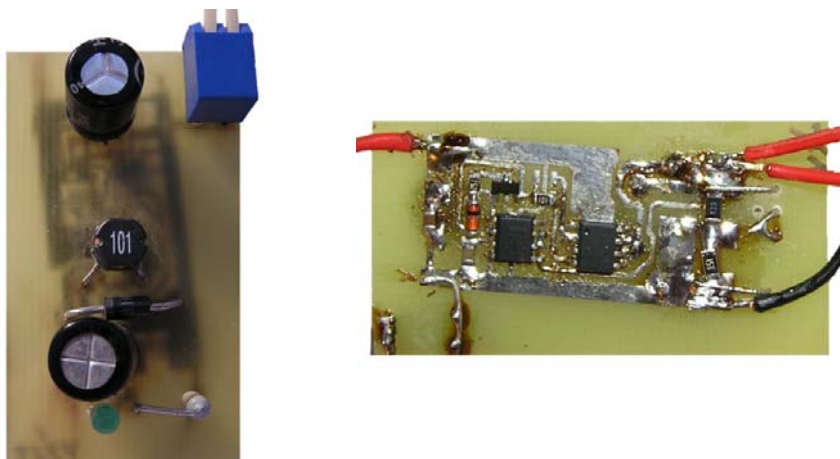


Obr. 47 Modifikace doporučeného zapojení pro zvýšení účinnosti

Vnitřní spínací člen přímo ovládá malý unipolární NPN tranzistor, který se chová jako invertor. Ten následně spíná výkonový MOS-FET P s malým odporem kanálu (R_{DS-ON}). Touto úpravou se sníží tepelné namáhání obvodu, což má i důsledek ve zvýšení účinnosti měniče.

Výstupní napětí měniče se odvozuje od vnitřního referenčního napětí. Správnou volbou rezistorů R203 a R202 bylo nastaveno výstupní napětí na hodnotu 3 V, které vyhovuje pro napájení bezdrátového modulu. Kondenzátory C201 a C206 byly nahrazeny většími modely s kapacitou 10 μF a keramickým dielektrikem X7R. Tyto kondenzátory se

vyznačují velice nízkou hodnotu ESR (Equivalent Series Resistance) řádu $\text{m}\Omega$. Kondenzátory C202 a C205 jsou klasické elektrolytické modely. Hodnota ESR u nich již není tak důležitá, proto se mohla volit podstatně vyšší kapacita. Cívka L201 je v provedení SMD s označením TDR54 a indukčností 100 uH . Vzhledem k nízkému provoznímu proudu je možné použít tento typ tlumivky. V případě vyšších proudů, by již nestačila a musela by se nahradit ekvivalentní tlumivkou s větším jádrem. Dioda D201 (D1) je typu Schottky s maximálním proudem v propustném směru 1 A . Desku plošného spoje vytvořeného snižujícího měniče můžeme vidět na obr. 48.



Obr. 48 Deska plošných spojů snižujícího měniče napětí (oboustranně osazená součástkami)

Uvedený měnič se jeví jako velmi dobrá alternativa ke standardnímu lineárnímu stabilizátoru napětí. Účinnost zařízení se pohybuje mezi $75 \% - 92 \%$ v závislosti na odběru proudu. Výstupní zvlnění plně vyhovuje a nepůsobí rušivě na připojené bezdrátové moduly. Vysokofrekvenční složka je účinně filtrována pomocí speciálních keramických kondenzátorů s velmi malým ESR.

6.5 ***Funkční celek alternativního zdroje napájení pro bezdrátové moduly***

Po sestavení všech komponent alternativního zdroje napájení zatím bez připojeného bezdrátového modulu fungovalo vše na první pokus a jednotlivé části po jejich proměření vykazovaly požadovaná napětí. Snižující (BUCK) měnič napětí byl ještě na vstupu osazen přepínačem, který zapíná či vypíná samotný měnič, včetně připojeného bezdrátového modulu. Tím se nemusí v případě dlouhodobé nečinnosti bezdrátového modulu odpojovat napájecí napětí z měniče, popř. přímo z akumulátoru.

Před osazením posledního článku (bezdrátového modulu), pro který bylo celé zařízení konstruováno, je potřeba provést na samotném modulu malé úpravy. Bezdrátový modul byl zapájen do desky plošného spoje s vyvedením na oboustranné kolíkové lišty pro snadnější přístup k jednotlivým pinům modulu a možnost programování. Programování bezdrátového modulu bez připojení do senzorové či řídicí desky je popsáno v kapitole 5.4.

Pro tento účel byl vytvořen jednoduchý obvod pro programování bezdrátových modulů se stabilizátorem napětí o velikosti 3,3 V. V této kapitole je také schematický popis pinů, na které je nutné přivést napájecí napětí a u kterých je nutné dodržet spojení pro správnou funkci modulu. Blokové schéma funkčního celku alternativního zdroje napájení pro bezdrátový modul je možné vidět na obr. 49.



Obr. 49 Blokové schéma funkčního celku alternativního zdroje napájení

V případě akumulátorového napájení je potřeba vždy u bezdrátových modulů měřit hodnotu napětí na akumulátorech a tato hodnota by měla být odesílána jako jedna z měřených veličin. Mikroprocesor JN5139 má implementován snímač teploty, a proto v tomto případě je odesílána i hodnota teploty mikroprocesoru, nesoucí spíše informativní charakter. Pokud by byl vytvořen další obvod přizpůsobující napětí solárního panelu na A/D převodník bezdrátového modulu, např. použitím obvodu LM358 (tento obvod byl vytvořen pro řízení technologického procesu), nebo pomocí děliče napětí, pak je možné měřit velikost napětí na solárním panelu v závislosti na dopadajícím světelném záření. Celý pohled na sestavený alternativní zdroj napájení s bezdrátovým modulem je vidět na Obr. 50.



Obr. 50 Alternativní zdroj napájení pro bezdrátový modul ze strany solárního panelu a ze strany desek plošných spojů

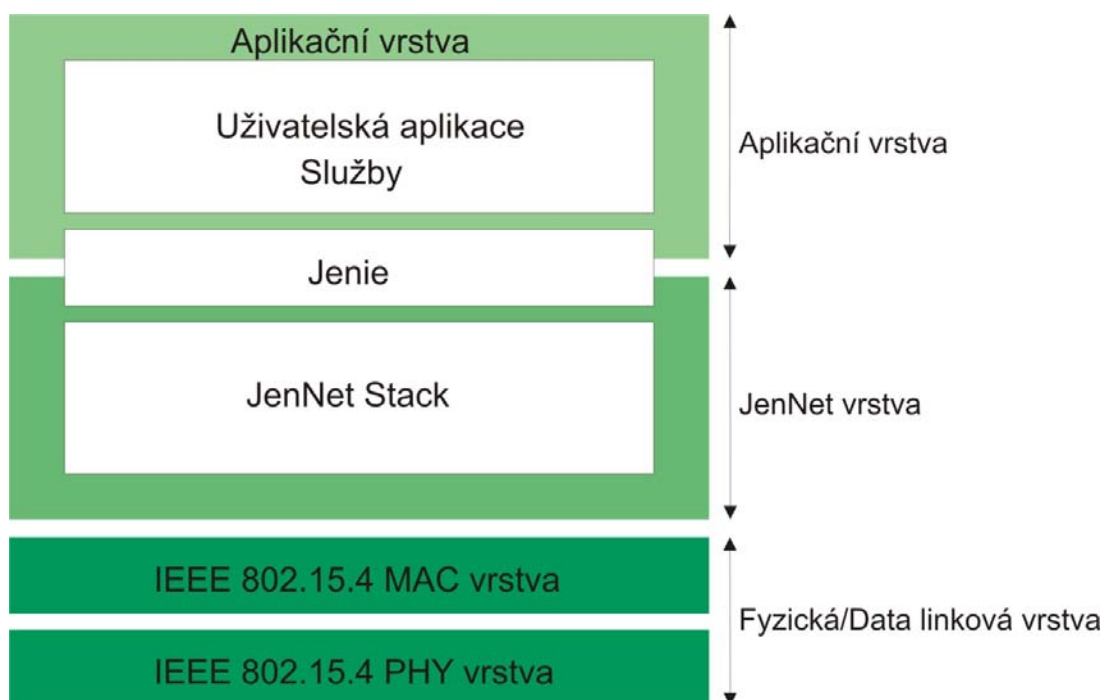
7 JenNet protokol stack

Protokol *JenNet* byl vyvinutý společností Jennic a poskytuje jednu ze základních vrstev pro tvorbu širokého spektra nejrůznějších aplikací. Je to alternativa k protokolu ZigBee. *JenNet* se snaží překonat omezení spojená s bezdrátovou komunikací, jako je např. vyšší spotřeba bezdrátových stanic, menší dosah, omezené pokrytí signálem, nebo třeba náchylnost uzlu na výpadek rádiového spojení apod. Staví na standardu IEEE 802.15.4, stejně jako ZigBee na definované fyzické a data linkové vrstvě, kde *JenNet* stejně jako ZigBee zvyšuje funkčnost a přidává určitou inteligenci do přenosu dat potažmo paketových rámců, ovšem s určitými rozdíly.

Mezi jedny z užitečných funkcí této vrstvy je také možnost stromové struktury spojení modulů, naslouchání před samotným vysíláním, spánkový režim, nebo kooperace s dalšími bezdrátovými technologiemi jako je Bluetooth nebo Wi-Fi, ovšem ve stejném operačním prostředí vyvíjeného tutéž společností.

7.1 Architektura a komponenty JenNet vrstvy

Protože veškeré vytvořené aplikace, resp. programované bezdrátové sítě *ATJenie* a *Jenie* (budou popsány v dalších kapitolách) využívají *JenNet* síťovou vrstvu, je vhodné si ukázat, jak bude vypadat zjednodušený ISO/OSI model. Ten můžeme vidět na obr. 51. V této architektuře můžeme vidět také jakýsi mezičlánek s názvem *Jenie*, který je mezi síťovou vrstvou a aplikační vrstvou. Jedná se o softwarové rozhraní, které poskytuje mechanismy pro komunikaci mezi uživatelskou aplikací, *JenNet* protokolem stack a dalšími vrstvami jako je fyzická a data linková vrstva.



Obr. 51 Architektura Jennic – *JenNet* síťová vrstva

Rozhraní *Jenie* bude popsáno v kapitole 9. Fyzická a data linková vrstva je definována standardem IEEE 802.15.4 a je popsána v kapitole 2.3.5. *JenNet* vrstva řídí adresování a směrování zpráv, a tím vyvolává příslušné akce pro nižší MAC vrstvu. Její úlohy jsou:

- Spouštění sítě.
- Přidávání a odstraňování modulů ze sítě.
- Směrování zpráv do jejich cíle.
- Aplikace bezpečnostního opatření pro odchozí data.

Tato síťová vrstva spolupracuje se službami v aplikační vrstvě pomocí pojítka *Jenie*.

7.2 Identifikace modulů v síti a identita sítě

Každý modul v bezdrátové síti má svou specifickou MAC adresu. Jedná se o 64-bitovou adresu, která identifikuje jednotlivý modul. Tato adresa modulu je přiřazována organizací IEEE a je unikátní na celém světě. Kromě této adresy existují i další identifikační znaky nejen samotného modulu, ale také celé komplexní sítě. Jedná se o síťové aplikační ID a PAN ID. Tyto hodnoty slouží k odlišení jiných sítí, které využívají pro přenos dat stejný prostor.

Síťové aplikační ID je 32-bitová hodnota, která slouží v celém použití k identifikaci vytvořené Jennic sítě. Tato hodnota by měla být vždy odlišná od hodnoty sousedních sítí. Zpravidla se ponechává hodnota, která bývá přednastavena z výroby. Pokud by došlo ke kolizi s jinou sítí, je možné změnit tuto hodnotu tak, aby ID bylo opět unikátní. To lze také provést mechanismem, který náhodně změní hodnotu ID. Jako jistou poslední variantou je odposlouchávání okolního prostoru (ostatních Jennic sítí) a zjištění okolních používaných aplikačních ID.

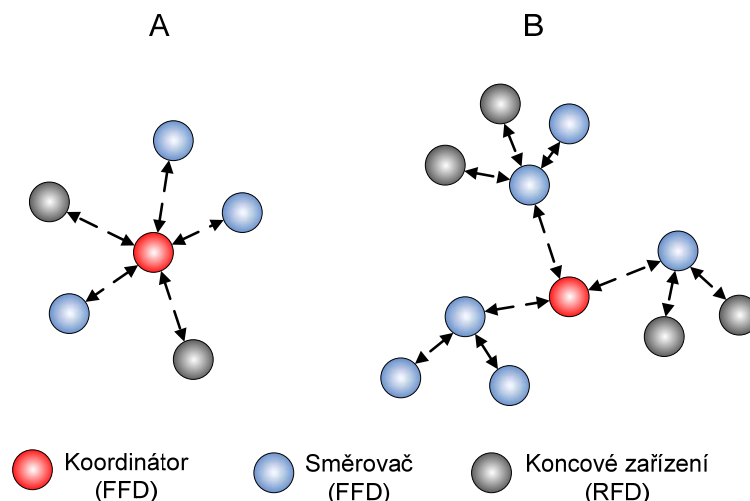
PAN ID (Personal Area Network ID) je 16-bitová hodnota, která je používaná nižšími vrstvami protokolu stack k identifikaci sítě. Tato hodnota musí být jedinečná. Hodnota může být nastavena samotným vývojářem jako pevná, nicméně lze zvolit i možnost dynamického přidělení. V tomto případě koordinátor naslouchá ostatním sítím a pokud PAN ID je unikátní (není použito pro jiné sítě) je tato hodnota nastavena. Pokud koordinátor nalezne okolní síť v jeho dosahu s daným PAN ID, zvyšuje jeho hodnotu do té doby, dokud nenalezne unikátní nevyužívanou hodnotu a tu přiřadí síti. Takže v konečném důsledku je počáteční hodnota PAN ID nastavena na libovolnou hodnotu a v případě kolize dynamicky změněna.

Teoreticky je možné provozovat dvě sítě, které mají stejné síťové aplikační ID a to dokonce na stejném přenosovém kanálu, protože tyto sítě budou mít vždy odlišné PAN ID. V praxi však v tomto případě mohou nastat problémy. Pokud se směrovač nebo koncová stanice bude připojovat do sítě přes síťové aplikační ID, které je pevně nastaveno a je totožné s vedlejší sítí, může dojít k situaci, že daný přípojný uzel nezná PAN ID sítě, ale

zná pouze pevně zadanou hodnotu síťové aplikační ID. Hodnota PAN ID může být teprve vyhledávána koordinátorem nebo nastavována a síť tedy není kompletně připojena. K tomuto stavu může také dojít, když dvě stejné sítě jsou aktivovány ve stejnou dobu. Ovšem v tomto čase se za pomoci aplikační síťové ID může nový modul připojit k danému uzlu. Tímto může nastat situace, že nový modul se připojí do jiné sítě, než do které měl být skutečně připojený. Tomuto se dá vyhnout řízením povolení připojování do sítě, tzn. že připojení nové stanice řídí přípojný uzel (směrovač nebo koordinátor). Další možnost jak oddělit sítě je využívat vyhrazený kanál, ovšem zde se vystavujeme nebezpečí přetížení. Zaručenou variantou je používat šifrování pro veškerou komunikaci v síti. *JenNet* nabízí 128-bitové AES šifrování, aby nedocházelo ke vniknutí do sítě z okolních sítí. Jedná se vysoce bezpečnostní systém šifrování, který je přímo zabudován do mikroprocesorů JN5139 jako hardwarová funkce, viz obr. 29, v kapitole 5.2.

7.3 Topologie *JenNet* sítí

JenNet poskytuje možnost vytvářet rozsáhlé sítě ve dvou síťových topologiích. Jedná se o topologii hvězda a strom, viz obr. 52. Pro naše účely má větší význam stromová struktura s možností komunikace mezi jednotlivými uzly v síti.



Obr. 52 *JenNet* síťové topologie A) hvězda B) strom

Cesta, jakou jsou zprávy směrovány z jednoho modulu ke druhému, je závislá na topologii sítě:

Hvězda: Síť má centrální modul v roli koordinátoru sítě, který je spojený se všemi dalšími moduly v síti. Všechny zprávy musí projít přes tento centrální bod a ten zprávy předá do cílové stanice. Tato síť bývá obvykle tvořena kromě samotného koordinátoru koncovými stanicemi, popř. směrovači. Při použití směrovačů je nutné zakázat funkci směrování a tedy i možnost připojení dalších stanic. Nevýhodou této topologie je, že koordinátor může být přetížen komunikací. Abychom vytvořili síťovou topologii hvězda, nemusíme nutně využívat síťovou vrstvu *JenNet*. Toto uspořádání nabízí i základní protokol úrovně IEEE 802.15.4. Pokud je ale *JenNet* vrstva aktivní, je zodpovědná za řízení předávání zpráv vzhledem k aplikaci běžící na koordinátoru.

Strom: Tato síť je složena ze všech výše uvedených prvků sítě, ovšem v této topologii musí mít směrovač povoleno směrování a tedy i možnost připojení dalších stanic. Tímto větvením a tvorbou uzlů vytváříme stromovou strukturu sítě. Koordinátor je spojen se směrovači a koncovými stanicemi, které můžeme nazvat jako jeho děti. Směrovač může být spojen s dalšími směrovači nebo koncovými stanicemi, což jsou zase děti směrovače. Takto lze pokračovat dále a vnořovat jednotlivé uzly do sítě. Koncové stanice nemohou mít pod sebou další moduly, tedy nemohou být rodiči. Komunikace v takovéto síti se řídí určitými pravidly, a to, že dítě může komunikovat přímo s jeho rodičem a rodič může komunikovat s jeho dětmi a s jeho vlastním rodičem. Tzn., že při posílání zpráv z jednoho modulu do druhého musí zpráva putovat od svého zdroje (modulu, který ji vyslal) směrem nahoru ve stromu k nejbližšímu předchůdci (směrovači nebo koordinátoru) a pak v závislosti na směrování putuje směrem dolů ve stromu ke svému cíli.

V *JenNet* síti musí být na každém směrovači a koordinátoru konfigurován počet stanic (dětí), které se k němu mohou připojit. Je to maximální počet požadavků, které může směrovač nebo koordinátor přijmout, přičemž modul, který se bude připojovat, může být ve funkci směrovače nebo koncové stanice. Výchozí hodnota je nastavena na 10 stanic a programátor si může stanovit, kolik stanic se může připojit ke koordinátoru sítě nebo kolik se může připojit stanic k danému směrovači. Tímto způsobem si můžeme určitým způsobem formovat bezdrátovou síť.

7.4 Přenos dat a směrování rámců

Normálním režimem bezdrátových modulů je odesílání a příjem dat od ostatních modulů. *JenNet* podporuje dvě metody, jak odesílat data z modulu do jiného modulu v závislosti na topologii sítě.

- Použitím adresy cílového modulu.
- Použitím adresy modulu, který představuje další hop (skok) pro síťovou komunikaci. Tedy následující modul, přes který bude komunikace probíhat, aniž by byl zrovna cílovým modulem.

Pro každou síťovou formaci ale platí, že pakety jsou předávány v síti od modulu k modulu, dokud nedorazí ke svému cíli, což odpovídá popsané druhé variantě. V případě síťové topologie hvězda i strom se používají obě adresy, ovšem u hvězdy je následující modul pro komunikaci (další hop) právě koordinátor. U topologie strom je následující hop adresa rodiče daného modulu a ten přepošle zprávu do dalšího modulu. V případě, že je tento modul již cílovou adresou, pak se k identifikaci použije adresa cílového modulu. Pokud není, pokračuje se tímto způsobem dále v síti.

Mechanismus směrování paketů vyžaduje, aby koordinátor a směrovače měly uloženy informace o směrování. Jedná se o adresy modulů, které jsou uloženy v modulu ve dvou tabulkách:

Tabulka sousedních modulů – obsahuje adresy všech dětí, tedy modulů, které jsou k němu přímo připojeny a adresu jeho rodiče, ke kterému je sám připojen. Tato tabulka nezabírá v paměti mnoho místa, protože modul (směrovač nebo koordinátor) může mít maximálně 16 přímých dětí.

Směrovací tabulka – obsahuje adresy všech dětí a to nejen těch, které jsou přímo připojeny k danému modulu, ale i modulů, které jsou níže ve stromové struktuře). Směrovací tabulka je uložena v paměti modulu jako pole struktur, kde každá tato struktura je typu *tsJenieRoutingTable* a obsahuje informace o směrování. Struktury jsou automaticky plněny stackem při vytváření sítě. Pole struktur musí být v aplikaci konfigurováno za pomoci dvou globálních parametrů. Jedná se o parametr *gJenie_RoutingTableSize*, který určuje velikost pole a *gJenie_RoutingTableSpace* což je ukazatel na směrovací tabulku v paměti. Tedy že pole začne na tomto daném místě v paměti.

Obě tyto tabulky poskytují informace pro směrovač o všech jeho dětech a koordinátoru dávají informaci o celé síti.

Velikost směrovací tabulky má vliv na obsazení paměti RAM. Tab. 8 ukazuje, kolik paměti vyžaduje *JenNet* stack pro různou velikost směrovací tabulky.

Tab. 8 Paměť vyžadovaná *JenNet* stackem pro různou velikost směrovací tabulky

Velikost směrovací tabulky	Využívaná paměť [kB]	
	Koordinátor	Směrovač
25	41	41
100	42	42
250	44	44
500	47	47
1000	53	53

7.4.1 Připojení modulu do sítě

Když se připojí nový modul do bezdrátové sítě, musí se nejdříve v síti identifikovat. Musí být pro něj povolena možnost doručování zpráv, což není nic jiného, než aktualizace směrovacích tabulek příslušných směrovačů a koordinátoru.

Kroky, které se dějí bezprostředně po připojení nové stanice do sítě, vypadají následovně:

1. Nový modul odešle informaci do koordinátoru sítě. Uzly, kterými zpráva prochází (směrovače) si novou adresu modulu uloží do směrovací tabulky spolu s adresou modulu, který předal paket dále směrem nahoru v síti.
2. Když je zpráva doručena ke koordinátoru sítě, koordinátor odpoví zpět novému modulu potvrzením, že založil novou cestu a přidal si jej do směrovací tabulky. Zároveň posílá odezvu rodiči nového modulu, zda byl modul v síti povolen nebo zakázán.

3. Jakmile je modul v síti povolen, je na modulu do aplikační vrstvy generováno oznámení o připojení do sítě a také je uložena adresa rodičovského modulu.

7.4.2 Proces směrování

Po přijetí zprávy směrovačem dojde k následujícímu postupu směrování:

1. Směrovač nejdříve zkontroluje cílovou adresu, kam má být zpráva doručena a v případě, že je určena pro něj, zpracuje obsah zprávy.
2. Pokud zpráva není určena pro tento směrovač, zkontroluje tabulku sousedních modulů, zda je zpráva určená pro modul, který je jeho dítětem, tedy je přímo v jeho uzlu. Pokud je, zpráva je modulu odeslána.
3. Pokud předchozí testování nebylo úspěšné a zpráva má být doručena jinému modulu, směrovač zkontroluje svou směrovací tabulku, zda je zpráva určena pro modul, který patří do jeho potomků. Pokud tomu tak je, odešle zprávu na příslušný modul (směrovač), který patří do uzlu směrem k cílové adrese.
4. Když zpráva není určena pro nějakého z potomků směrovače, musí směrovač zprávu předat dál směrem výše ve stromové topologii na další směrovač. Pro koordinátor platí stejné pravidlo směrování, vyjma toho, že zpráva nemůže být předána dále směrem výše ve stromu.

Po celou dobu zde hovoříme o zprávách, nicméně je potřeba doplnit, že tyto zprávy jsou organizovány jako rámce skládající se z jednotlivých částí. Rámce obsahují přenášená data a v závislosti na jejich typu rozlišujeme účel komunikace, např. zda se jedná o potvrzovací rámec apod. Mezi jedny z těchto rámců patří také rámce, kterými rodičovské moduly zjišťují, zda jejich děti jsou stále v síti aktivní a naopak děti zjišťují, zda jsou jejich rodiče aktivní.

7.4.3 Potvrzení o přijetí zprávy

V případě, že odesíláme zprávu z jednoho modulu do druhého, může být modul, který zprávu obdržel požádán, aby odeslal zpět potvrzení, že zpráva byla skutečně doručena. Pokud ihned po přijetí zprávy nedostane modul odpověď o doručení, bude se snažit odeslat zprávu znovu. Potvrzovací zprávy se nazývají jako *Acknowledgements* a jsou implementovány do aplikační vrstvy. Tyto zprávy můžeme uživatelsky povolit nebo zakázat.

7.4.4 Pořadová čísla přenášených zpráv

Každá vyslána zpráva má své pořadové číslo. Toto číslo je uloženo v počátečních Byte přenášeného rámce a říká, v jakém pořadí byly jednotlivé zprávy vyslány. Moduly si tuto posloupnost přijatých zpráv ukládají a spolu s tímto číslem je uložena i adresa modulu, odkud zpráva pochází. Koncová stanice si ukládá pořadové číslo pouze poslední zprávy a je tedy přepsáno vždy novou příchozí zprávou. Koordinátor a směrovače si ukládají

pořadová čísla posledních deseti došlých zpráv. Jestliže dorazí zpráva, která má stejné pořadové číslo a stejnou adresu vysílajícího modulu, pak je tato zpráva zahozena. Tímto se zabráňuje předávání zpráv do aplikace, které byly vícekrát přijaty. Vždy ale platí, že nová zpráva, potažmo nová položka v historii pořadových čísel nahrazuje nejstarší uloženou položku.

7.4.5 Auto-ping a datová odezva

Při tzv. auto-pingu dochází v určité nastavené frekvenci k výměně informací mezi stanicí, která je připojena ke svému rodiči a rodičem, např. se může jednat o výměnu informací mezi koncovou stanicí a směrovačem. Modul se periodicky dotazuje, zda je jeho rodič aktivní a pokud je, rodič potvrzením odpoví modulu zpět. Pokud se ale stane, že rodič neodpovídá, modul v roli dítěte odešle v pořadí za sebou několik dalších pingů (dotazů na rodiče).

Pokud ani po této sekvenci nedojde k žádné odpovědi, pak se modul domnívá, že jeho rodič je ztracen (tímto i sám modul je odpojen ze sítě) a musí se proto pokusit o znovu připojení do sítě např. k jinému směrovači nebo koordinátoru. Pokud je rodič přítomen, ale nezná jeho dítě, není jeho vlastníkem, pak odešle zpět odpověď modulu, že jej nezná. V aplikaci dostáváme odezvu typu „Unknown-node“ a modul se musí opět pokusit připojit do sítě.

Funkce auto-ping je ve výchozím stavu povolena, ovšem může být aplikačně zakázána, což není výhodným řešením při tvorbě senzorových sítí.

V případě datové odezvy se jedná především o stav, kdy koncová stanice je v režimu spánku, tedy šetří elektrickou energii, a proto nemůže přijímat data. Rodiče tohoto modulu si data uloží v paměti, a když je modul znovu aktivní, zeptá se svého rodiče, zda pro něj nejsou připravena nějaká data. Pokud ano, rodič ve funkci směrovače nebo koordinátoru data koncové stanici okamžitě odešle. Rodič může uložit maximálně 12 zpráv. Pro tento typ komunikace s rodičem se používá funkce *eJenie_PollParent()*, kde pro periodu dotazů na rodiče se nastavuje globální proměnnou *gJenie_EndDevicePollPeriod*. Pokud je hodnota proměnné nastavena na nulu, je funkce datové odezvy zakázána. Jako výchozí bývá tato hodnota nastavena na 5 sekund, což znamená, že spánkový režim nastavený funkcí *eJenie_SetSleepPeriod()*, která má jeden z parametrů dobu spánku pro koncovou stanici, nesmí být delší než datová odezva. Pokud je čas spánku koncové stanice delší, rodič data pro stanici zahodí.

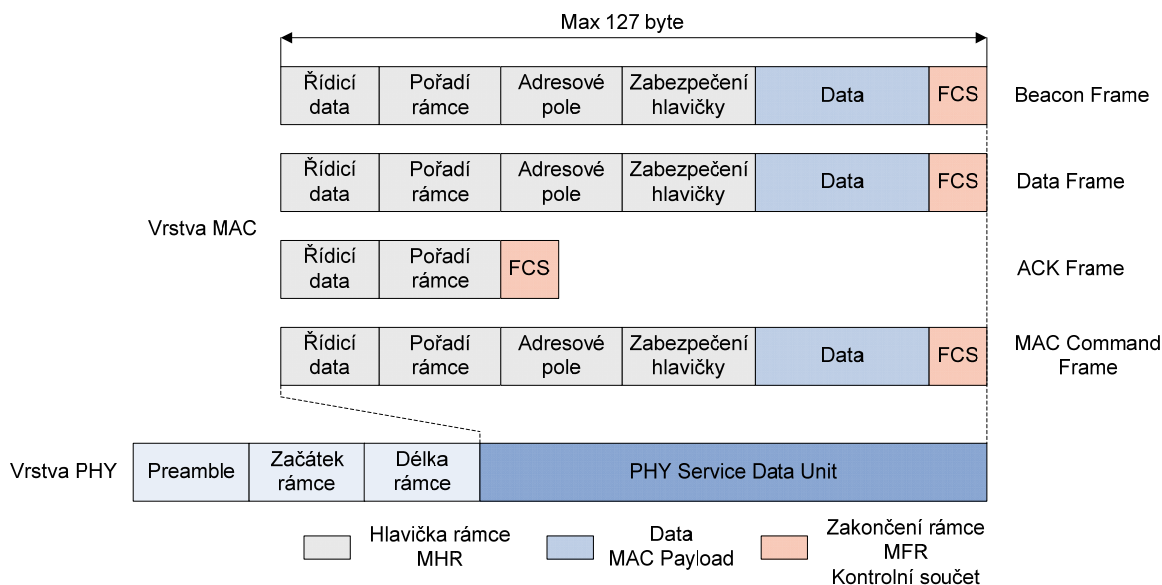
7.5 Struktura a typy datových rámců

Jak již bylo naznačeno dříve, jednotlivé typy rámců určují, o jaký typ komunikace se v síti jedná. V této podkapitole si ukážeme složení a typy jednotlivých rámců. Standard IEEE 802.15.4 definuje čtyři typy rámcových struktur:

- Beacon rámeček (Beacon Frame).
- Datový rámeček (Data Frame).

- Potvrzovací rámeček (ACK Frame).
- MAC příkazový rámeček (MAC Command Frame).

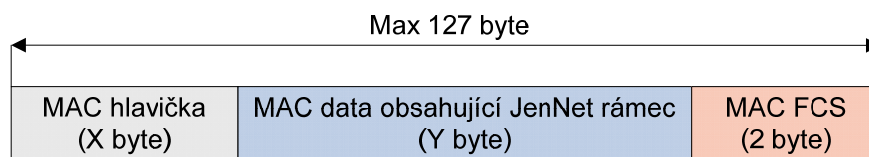
Každý rámeček se skládá z hlavičky rámečku (MHR – MAC Header), obsahu přenášených dat (MAC payload) a MAC zakončení (MFR - MAC footer). Na obr. 53 můžeme vidět struktury těchto rámečků i s tím, jak vypadá rámeček na fyzické vrstvě PHY.



Obr. 53 Struktury přenášených rámečků

Nebudeme zde popisovat každý výše vyjmenovaný rámeček, tedy k čemu slouží, to již bylo uvedeno v kapitole 2.3.5, popř. více, viz [Farahani, 2008]. MAC rámeček má maximální délku 127 Byte rozděleného do hlavičky, obsahu dat a kontrolního součtu (FCS – Frame Check sequence). My se zaměříme spíše u těchto rámečků na obsah dat, protože ten je určen síťovou vrstvou *JenNet* a je pro funkci ve vytvořených senzorových sítích podstatný.

JenNet rámeček je přenášený jako obsah dat rámečku IEEE 802.15.4. Takže zjednodušeně vypadá celý MAC rámeček takto:



Obr. 54 Struktura MAC rámečku s daty *JenNet* rámečku

Nyní si zkusíme podrobněji popsat tento *JenNet* rámeček a typy těchto rámečků, které jsou ve vytvořených sítích využívány. Hlavička *JenNet* rámečku má velikost 12 Byte, viz obr. 55 a tělo rámečku může mít maximální velikost 91 Byte, viz obr. 57.

Označení rámečku (1 byte)	Pořadové číslo rámečku (1 byte)	Typ rámečku (1 byte)	Zdrojová adresa (8 byte)	CRC (1 byte)
------------------------------	------------------------------------	-------------------------	-----------------------------	-----------------

Obr. 55 Hlavička *JenNet* rámečku

CRC (Cyclic Redundanci Check) v hlavičce znamená kontrolní součet. Zdrojová adresa uvádí 64-bitovou MAC adresu bezdrátového modulu a pořadové číslo rámce bylo popsáno v kapitole 7.4.4. Jednotlivé bity v označení rámce mají svůj význam. Využívají se ale pouze 4 bity tohoto pole, zbylé bity jsou nepoužívané. Obsah označení rámce můžeme vidět na obr. 56.

bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	Koncová stanice bit 3	Odpověď bit 2	Požadavek odpovědi bit 1	Stav požadavku bit 0
-------	-------	-------	-------	--------------------------	------------------	--------------------------------	----------------------------

Obr. 56 První Byte hlavičky *JenNet* rámce - pole označení rámce

Bit 3 nastavený na hodnotu 1 říká, že modul je spící koncová stanice. Bit 2 v hodnotě 1 označuje, že rámec je odpověď. Bit 1 nastavený na hodnotu 1 označuje, že odesílatel (modul) vyžaduje zpětnou odpověď z cílové stanice a konečně poslední bit 0 informuje o stavu požadavku. V hodnotě 1 říká, že požadavek byl úspěšně vykonán.

Pole *Typ rámce* v hlavičce *JenNet* rámce může nabývat hodnotu od 0 do 16. Každá tato hodnota vyjadřuje, o jaký typ rámce se bude jednat (např. rámec pro nalezení modulu apod.), viz tab. 9.

Tab. 9 Hodnoty a význam v poli *Typ rámce*

Hodnota	Typ rámce
0	DATA_TO_COORD
1	DATA_TO_PEER
2	ESTABLISH_ROUTE
3	DELETE_ROUTE
4	REPAIR_ROUTE
5	ACTIVATE_SERVICES
6	SERVICE_REQUEST
7	PING
8	UNKNOWN_NODE
9	DATA_TO_NETWORK
10	Nevyužito
11	DATA_TO_SERVICE
12	PURGE_ROUTE
13	FIND_NODE
14	ROUTE_REQUEST
15	ROUTE_IMPORT
16	SET_DEPTH

Tělo *JenNet* rámce je závislé právě na typu rámce, který byl uveden v tab. 9. Čili existuje 16 možných typů rámců, které lze použít [Jennic JenNet 2009]. Nebudeme si je všechny uvádět, vybereme např. typ rámce DATA_TO_COORD a DATA_TO_SERVICE, jejichž strukturu můžeme vidět na obr. 57.

Rámec DATA_TO_COORD

Hlavička (12 byte)	Přenášená data (Max 91 byte)
-----------------------	---------------------------------

Rámec DATA_TO_SERVICE

Hlavička (12 byte)	Cílová adresa (8 byte)	Služba zdroje (4 byte)	Služba cíle (4 byte)	Data (Max 75 byte)
-----------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------	-----------------------

Obr. 57 Struktura dvou typů rámců

Rámec DATA_TO_COORD se používá pro odeslání dat z koncové stanice nebo směrovače do koordinátoru. V tomto případě není vyžadována cílová adresa, protože koordinátor je na špici celé stromové struktury a je centrem pro síťovou topologii. Adresa modulu (adresa zdroje, který data odesílá) je uvedena v hlavičce rámce.

Druhý rámec DATA_TO_SERVICE se používá pro odeslání dat do připojené služby na jiném modulu, kde známe jeho MAC adresu. Adresa modulu odesílajícího data je uvedena v hlavičce a cílová adresa je součástí těla rámce.

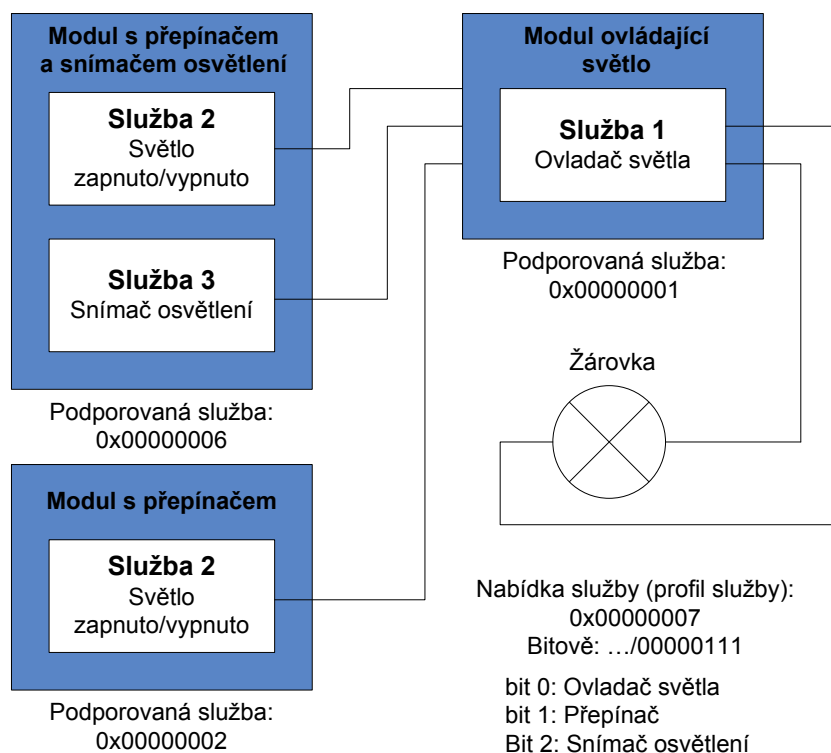
Tyto typy rámců byly vybrány záměrně, protože na prvním rámcí můžeme vidět maximální velikost těla rámce a druhý jsme vybrali proto, že dále se budeme zabývat tím, co jsou to služby a vazbami mezi moduly, proto tento rámec je jeden z důležitých ve vytvořených sítích.

8 Služby a vazby mezi službami

Službou označujeme v softwarové podpoře *Jenie*, potažmo síťové vrstvě *JenNet*, určitou schopnost bezdrátového modulu poskytovat nebo přijímat data. Tzn., že ze vzdáleného bezdrátového modulu se můžeme připojit k jinému modulu na vybranou službu a tuto službu využívat. Každá naprogramovaná funkce musí být uvedena jako služba a musí být v síti registrována pro možnost využívání jinými moduly, aby se mohly k této službě připojit. Jako příklad takové služby může být:

- Senzor teploty.
- Senzor osvětlení.
- LCD displej.
- Tlačítka.

Každý modul pracující na síťové vrstvě *JenNet* může podporovat až 32 samostatných služeb. Každá služba musí být v síti dostupná, aby ji mohly využívat ostatní moduly. Služba je identifikována ID číslem (1 až 32), kde reprezentace ID služby je dána bitovou pozicí v síťové nabídce služeb. Dvě služby musí společně korespondovat, aby mohly mezi sebou vzdáleně komunikovat. Čili jedna služba musí poskytovat data pro jinou spojenou službu a naopak, např. teplotní senzor a regulátor ovládání topení jsou služby, které společně korespondují. V jiném případě teplotní senzor a ovladač otevírání garážových vrat nejsou kompatibilní služby. Ukázku kompatibilních vybraných služeb můžeme vidět na obr. 58. Jedná se o propojení služeb poskytující ovládání světla, o spojení služeb přepínače, snímače osvětlení a ovladače světla (žárovky). Na obrázku můžeme vidět, že dva moduly využívají stejnou službu označenou jako službu 2 pro ovládání světla. Uživatel musí sám ve své aplikaci rozhodnout, které služby jsou kompatibilní a které je možné vzájemně mezi sebou propojit. Je to samozřejmě závislé na aplikaci, kterou si uživatel programuje.



Obr. 58 Příklad propojení služeb mezi moduly

8.1 Nabídka služeb

Síť nabízí nabídku služeb (profil služeb), které zpřehledňují všechny dostupné služby v síti. Jedná se o 32-bitovou hodnotu, kterou programátor uzpůsobí podle svých požadavků, podle své aplikace. Každá bitová pozice ve 32-bitovém čísle odpovídá konkrétní službě, kde 1 znamená, že služba je podporována a 0 znamená, že služba podporována není. Pozice bitu odpovídá ID službě následovně: bit 0 představuje službu 1, bit 1 službu 2, až bit 31 představuje službu 32.

Nabídka služeb tedy obsahuje seznam všech dostupných služeb v systému s jejich příslušným ID číslem služby. V obr. 58 je nabídka služby vyjádřena hexadecimální hodnotou 0x00000007.

8.2 Přehled služeb

V nastavení *JenNet* sítě musí být implementována možnost najít všechny dostupné služby a moduly, které je poskytují. Tato funkce se nazývá *Přehled služeb* a každý modul musí pro tento přehled splnit dvě podmínky. První podmínkou je, že celá síť musí vědět o službách, které má modul registrované a nabízí je. Druhou podmínkou je, že modul musí být schopen najít v síti další služby, které jsou s jeho vlastní službou kompatibilní, což se provádí požadavkem modulu na služby jiného modulu. Například již zmíněný regulátor topení může mít zájem o komunikaci s teplotním senzorem.

Uvedená první podmínka se týkala registrace služby. Po registraci vlastně modul propaguje do sítě, jaké služby nabízí. V síti to ale vypadá tak, že směrovač nebo

koordinátor udržuje seznam služeb přímo u sebe, ale koncové stanice mají seznam služeb zapsané u svého rodiče, tedy směrovače nebo koordinátoru a ten je může nabízet dále v síti. Pro registraci služby můžeme použít funkci *eJenie_RegisterServices(uint32 u32Services)*, s parametrem služby, která vrací úspěšnost či neúspěšnost registrace služby. U koncové stanice je oproti směrovači či koordinátoru situace o něco složitější, protože registrace probíhá na nadřazeném modulu. Koncová stanice musí odeslat žádost o registraci služby na nadřazený modul a čeká na odpověď, zda byla registrace úspěšná či nikoliv. O úspěšnosti nás v aplikaci informuje odpověď typu *E_JENIE_REG_SVC_RSP*, což je hodnota vrácená funkcí *vJenie_CbStackMgmtEvent(teJenieEventType eEventType, void *pvEventPrim)* vyvolaná nižší vrstvou stack. Její parametry jsou popsány níže, protože tato funkce souvisí i s požadavkem na dotazování se na služby.

Druhá podmínka týkající se nalezení služeb je o dotazování se modulem na služby, které jsou přístupné pro bezdrátový modul. Tento dotaz se provádí pomocí funkce *eJenie_RequestServices(uint32 u32Services, bool_t bMatchAll)*, s parametry 32-bitové hodnoty požadované služby a s ověřením, zda je tato služba (nebo služby) na modulu přítomna či nikoli. Jako odpověď je vrácená hodnota *E_JENIE_SVC_REQ_RSP* jako parametr funkce *vJenie_CbStackMgmtEvent(teJenieEventType eEventType, void *pvEventPrim)*, s ukazatelem na typ události. Funkce je volaná z nižší vrstvy stack. Mimo jiné je také vrácena 64-bitová MAC adresa příslušného vzdáleného modulu a 32-bitová hodnota, která popisuje služby podporované modulem. V naší aplikaci si pak můžeme určit, se kterým modulem chceme dále komunikovat a na jakou službu se připojit.

8.3 Vazby mezi službami

V aplikacích postavených na *JenNet* protokolu stack je možné jednotlivé služby mezi sebou svázat, čímž zajistíme komunikaci mezi moduly. Takže jedna služba na jednom bezdrátovém modulu může být svázána s jinou kompatibilní službou na dalším modulu. Po tomto svázání se zjednoduší komunikace, protože moduly nepotřebují při každém přenosu cílovou adresu bezdrátového modulu. Samozřejmě že se jedná pouze o jakousi možnost komunikace mezi bezdrátovými moduly, aniž bychom potřebovali neustále zadávat adresu cílového modulu. Pokud si vazby nepřejeme, bez adresy cílového modulu se neobejdeme.

Pokud chceme svázat dvě služby mezi sebou, je nutné specifikovat lokální službu modulu, adresu vzdáleného modulu a službu vzdáleného modulu. Vrstva *Jenie* nabízí pro spojení služeb funkci, kterou nemusíme programovat, jedná se o funkci *eJenie_BindService(uint8 u8SrcService, uint64 u64DestAddr, uint8 u8DestService)*, a pro odpojení pak funkci *eJenie_UnBindService(uint8 u8SrcService, uint64 u64DestAddr, uint8 u8DestService)*, kde parametry funkcí jsou logické a výše popsány.

9 Rozhraní Jenie

Jenie poskytuje rozhraní, které dovoluje komunikovat uživatelské aplikaci s *JenNet* síťovou vrstvou a potažmo pak s fyzickou a datově linkovou vrstvou IEEE 802.15.4. *Jenie* funkce a příkazy slouží v aplikačním (uživatelském) kódu pro předávání instrukcí či dat směrem k nižší softwarové stack vrstvě modelu Jennic a k řízení a zpracování událostí, které přichází z nižší softwarové stack vrstvy. Tento softwarový mezičlánek je umístěn mezi aplikační vrstvou a síťovou vrstvou Jennic architektury, viz obr. 51. Tato funkční architektura pracuje na každém bezdrátovém modulu v síti a předáváním mezi jednotlivými vrstvami dochází ke komunikaci mezi uživatelskou aplikací a vysílačem/přijímačem.

9.1 Hlavní funkce Jenie

Jenie poskytuje funkce pro správu síťových úloh, přenos dat a systémových úloh. Mezi základní úlohy *Jenie* patří:

Správa síťových úloh, které řídí:

- Konfiguraci a inicializaci sítě.
- Spouštění zařízení jako koordinátor, směrovač nebo koncové zařízení.
- Zjišťují, zda koordinátor nebo směrovač přijímá žádosti o připojení dalších modulů.
- Oznamují o službách modulu a vyhledávají služby vzdálených modulů.
- Zavedení spojení mezi lokálními a vzdálenými službami modulu.
- Řízení událostí protokolu stack.

Řeší úlohy přenosu dat:

- Odesílání dat do vzdáleného modulu nebo vysílání dat do všech směrovačů.
- Odesílání dat do připojené služby na vzdáleném modulu.
- Řízení stack datových událostí.

Systémové úlohy se z větší části zabývají spánkovým režimem pro koncové stanice, ovládáním vysílání modulu a hardwarovými událostmi. Mezi tyto úlohy patří:

- Nastavení a spouštění spánkového režimu koncové stanice.
- Nastavení, spouštění a ukončení rádiového vysílače.
- Ověřování, zda je modul v provozu.
- Řízení hardwarových událostí.

Všechny výše uvedené úlohy patří do tzv. „Application to Stack“ funkcí, kterých je celá řada. Jedná se o funkce, které jsou volány v uživatelské aplikaci, aby vyvolaly určité úlohy v nižších vrstvách protokolu stack. Kromě těchto funkcí existují i funkce typu „Stack to Application“, které jsou volané událostmi z nižších vrstev protokolu stack. Jedná se o funkce, které musí být v uživatelské aplikaci definovány i když nejsou přímo součástí uživatelského kódu a jsou prázdné. Funkce poskytují příležitost uživatelské aplikaci přijmout informace z nižších vrstev protokolu a okamžitě na ně reagovat během vykonávání programu. Může se jednat např. o funkci, která informuje uživatelskou aplikaci, že nastala datová událost, jako kupříkladu příchozí data z jiného bezdrátového modulu.

9.2 **Hardwarové funkce**

Jenie také poskytuje funkce pro integrované periferie, neboli hlavní obvody mikroprocesoru JN5139, kde mezi ně např. patří:

- Převodníky A/D a D/A.
- Komparátory.
- Digitální I/O.
- UART0 a UART1.
- Časovače.
- Časovače řídicí spánkový režim modulů apod.

Ve vytvořených programech pro bezdrátové moduly je většina těchto funkcí využívána. Více o jejich popisu, viz [Jenie API 2010].

9.3 **Formy Jenie**

Softwarová podpora *Jenie*, která nám dovoluje dvě možnosti programování má k dispozici dvě formy:

Jenie API – toto aplikační programovací rozhraní (Application Programming Interface) obsahuje funkce, které mohou být začleněny do uživatelské aplikace, která pracuje na mikroprocesorech JN5139.

AT-Jenie – je typ rozhraní obsahující možnost naprogramovat sériové AT příkazy do mikroprocesoru bezdrátového modulu Jennic. AT příkazy můžeme ovládat naprogramované funkce v mikroprocesoru z jiné aplikace nebo jiného mikroprocesoru.

Pro obě tato rozhraní byly naprogramovány dva typy bezdrátových sítí, které pracují nejen na rozdílné formě *Jenie*, ale také mají odlišnou strukturu sítě. Obě sítě mají topologii strom, ale jedna síť je strukturovaná s pevným počtem připojitelných stanic (tato síť není rozsáhlá) a druhá jako univerzální plošně distribuovaná. Těmito vytvořenými sítěmi a vytvořenou softwarovou podporou, aplikací *Jenie Net.*, dovolující ovládání těchto sítí se budeme zabývat v kapitole 11.

10 Volba vizualizačního nástroje pro vytvořené sítě

V disertační práci budou vytvořeny dvě bezdrátové sensorové sítě, z nichž jedna bude umožňovat zakomponovat moduly pro řízení technologického procesu. Obecně se předpokládá, že bezdrátové sensorové sítě se budou skládat z velkého množství stanic, které budou mezi sebou komunikovat a předávat data směrem nahoru ve stromové struktuře až ke koordinátoru sítě. Ten je pak připojen nejčastěji k PC a na něm očekáváme vizualizaci bezdrátové sensorové sítě a také interakci se sítí. Různé společnosti, které vyrábějí nebo distribuují bezdrátové moduly standardu IEEE 802.15.4 se ZigBee stackem mají nástroje pro vizualizaci bezdrátových sítí a uživatel i pokud zná komunikační protokol a data, která jsou odesílána ve směru sběrná stanice ↔ nadřazená aplikace, většinou nemůže provádět zásahy do vizualizačního programu, protože nemá k dispozici zdrojové kódy aplikace. Tím pádem i jakákoliv změna kódu v bezdrátovém modulu představuje ztrátu komunikace nadřazené aplikace se sítí. Zaměřil jsem se tedy na bezdrátové moduly, které umožňují kompletní vlastní programování bezdrátových stanic a tedy přesně znám nejen komunikaci v síti, ale také komunikaci s vytvořenou nadřazenou aplikací.

Volba programovacího jazyka pro tvorbu nadřazené aplikace je většinou dána možnostmi uživatele, v jakém programovacím jazyku programovat umí. Je možné tedy použít jak vyšší tak nižší programovací jazyky jako jsou: C#, C++, Java, Visual Basic apod. Obecně poměrně častým problémem při tvorbě jakýchkoliv aplikací bývá, že aplikace je sice funkční, ale je složité jí dodat jistou grafickou obálku a nástroje, které budou vhodně prezentovat data či patřičnou reálnou vizualizaci. Proto jsem se zaměřil na prostředí, která jsou primárně určena pro vizualizaci, supervizní řízení výrobních technologií a procesů, jimiž jsme na naší katedře ATŘ 352 vybaveni. Vybíral jsem mezi prostředím InTouch 10 a Control Web 5. Oba dva produkty patří do skupiny SCADA/HMI (Supervisory Control and Data Acquisition / Human Machine Interface) systémů.

10.1 *InTouch 10*

Prostředí InTouch 10 je od společnosti Wonderware a jedná se o intuitivní prostředí, které umožňuje v reálném čase sledovat a reagovat na průběhy výrobních operací za pomoci komplexního grafického zobrazení. Pro sběr dat z technologického procesu je možné využít celou řadu komunikačních I/O serverů, které jsou vyrobeny přímo společnostmi Wonderware, či jiných softwarových společností. Součástí systému InTouch jsou také rozšiřující moduly Recipe Manager, SQL Access, SPC (Statistical Process Control) a další rozšiřující nástroje, viz [Stránky společnosti Pantek 2010]. Prostředí nabízí možnost využití událostně orientovaného skriptovacího jazyka s množstvím vestavěných funkcí. Bohužel se nejedná o podporu plnohodnotného programování, což je pro naše účely vcelku podstatné. Dalším záporem je, že InTouch standardně nenabízí ovladače pro podporu sériové komunikace jako je RS232. Tento přídatný modul je ale možné dokoupit, bohužel cena takového modulu je poměrně vysoká.

10.2 Control Web 5

Prostředí Control Web 5, podobně jako InTouch, slouží k vývoji průmyslových aplikací, umožňující vizualizaci a řízení technologických procesů v reálném čase. Je navrhován jako nezávislý na hardware s možností připojení s vhodným ovladačem na různá průmyslová zařízení jako PLC, I/O moduly, měřicí karty či jiná zařízení jako www servery apod. Podporuje tyto otevřené protokoly a standardy:

- ASCII komunikaci po sériové lince (znakový protokol využívající mnoho zařízení).
- DDE / NetDDE, Fast DDE (kompatibilní se staršími DDE servery).
- OPC Data Access (množství podporovaných OPC serverů).
- GSM modemy, SMS zprávy.
- HTTP přístup k WWW serverům.
- TCP / IP, HTTP, HTML (Ethernet, WiFi, dial-up, ...).
- ODBC / SQL.
- OPC (OLEfor Process Control).
- COM/ActiveX.
- GSM / GPRS.

Control Web aplikace dokáže sdílet data po síti, volat vzdálené metody a přistupovat na vzdálená data. Jedná se o architekturu client/server. Control Web má také k dispozici zabudovaný HTTP server a uživatel může vytvářet dynamické aplikace založené na WWW technologiích s přístupem pomocí standardních WWW prohlížečů. Umožňuje vytvářet serverové aplikace pro klienty na plnohodnotných PC i na mobilních telefonech. Je určen pro trvalý provoz a jeho vývojová i runtime verze je k dispozici v českém jazyce. Systém umožňuje využívání přístupových práv uživatelů v aplikacích s přidělenými oprávněními. Pro nás je velmi důležitý zabudovaný programovací jazyk, který dovoluje realizovat libovolné algoritmy a řídicí sekvence. Programové API jednotlivých komponent, které můžeme v aplikacích využívat, dovoluje jejich plně programové řízení, např. archivace dat. Kromě těchto funkcí je pro nás velmi důležitá možnost komunikace pomocí sériové linky a zabudovaného ovladače ASCII v.5.14.0.0. Více o tomto prostředí, viz [Control Web 2010].

11 Aplikace Jenie Net. a programované senzorové sítě

Protože společnost Jennic nemá k dispozici žádný softwarový nástroj, který by uměl komunikovat s bezdrátovou senzorovou sítí, získávat data a vhodně je prezentovat a také z důvodů potřeby testování navržených sítí, jsem vytvořil aplikaci *Jenie Net*. Název *Jenie Net*. znamená *Jenie Networks*, neboli *Jenie* sítě, které byly vytvořeny na softwarové podpoře *Jenie* a *JenNet* protokolu stack. Aplikace *Jenie Net*. představuje softwarový nástroj vytvořený v systému SCADA/HMI, prostředí Control Web 5, který slouží pro konfiguraci bezdrátových modulů, ovládání modulů v síti, vizualizaci, možnosti řízení technologického procesu (teplovzdušného modelu) a také distribuci dat do sítě Internet.

Obecně je velmi složité vytvořit prostředí, které by bylo univerzální pro interakci s různými typy sítí, protože přenosový protokol a složení přenosového řetězce mezi nadřazenou aplikací a bezdrátovým modulem si definuje sám programátor, což také platí pro naše případy. Pokud síť vytvořila společnost vyrábějící bezdrátové moduly nebo jiná třetí společnost vytvářející ovládací software pro sítě, pak většinou je uživatel takovéto sítě odkázán na aplikaci, která byla předprogramována (např. pro měření teploty) a nemá zpravidla možnost aplikaci pozměnit či rozšířit o další měření veličin. I z tohoto důvodu jsem vybral moduly, které je možné plnohodnotně programovat a podle požadavků měnit kód každému účastníkovi sítě a upravit i v případě potřeb nadřazenou aplikaci.

Existuje také řada programů umožňující monitorovat tok dat na sériové lince, jako např. prostředí HyperTerminal, který je součástí instalace MS Windows. Takže pokud uživatel ví, jak vypadají přenášovaná data z připojené sběrné stanice, může alespoň sledovat komunikaci. Bohužel tato prostředí nenabízí zpracování přijatých dat.

Seznam vlastností, které *Jenie Net*. nabízí pro monitorování a ovládání bezdrátových sítí:

- Konfiguraci bezdrátových stanic pro síťovou funkci koordinátoru, směrovače nebo koncové stanice (inicializace modulu).
- Sběr dat z připojených bezdrátových stanic.
- Sledování připojování a odpojování bezdrátových stanic do sítě (stromová topologie sítí).
- Měření veličin na dotaz nebo automatické měření veličin s nastavením frekvence vzorkování.
- Ovládání všech periferií senzorových a řídicích desek (LED diod, LCD displeje, monitorování stavu tlačítek).
- Měření veličin – měření teploty, relativní vlhkosti, osvětlení, napětí akumulátorů v případě akumulátorového napájení modulů.
- Možnosti doplnění modulů o další typy snímačů - *Jenie Net*. umožňuje zpracovat data ze všech A/D převodníků bezdrátových modulů.

- Různé způsoby identifikace bezdrátových modulů v síti (pomocí MAC adresy, bitová identifikace).
- Real-Time vykreslování měřených veličin.
- Ukládání měřených dat.
- Zpracování měřených dat (minimální, maximální hodnota, průměr z měřených dat, rozpětí, rozptyl apod.).
- Úspora elektrické energie bezdrátových modulů - uvádění koncových stanic do režimu „sleep“ (spánkového režimu s různým nastavením – s držením paměti, bez držení paměti) s nastavením doby tohoto režimu.
- Řeší vzdálené nastavení bezdrátových stanic a způsoby připojování k modulům (spojování služeb, tunelové spojení).
- Řízení technologického procesu, vizualizaci řízeného teplovzdušného modelu (byl vytvořen 3D model), bezdrátové nastavení parametrů regulátoru a regulačního procesu, volba typu regulátoru.

Aplikace *Jenie Net.* je programována pro vizualizaci a ovládání dvou sítí, kde jedna je s pevným počtem připojených stanic a druhá je jako univerzální pro připojení velkého počtu stanic (plošně distribuovaná síť). Úvodní obrazovku aplikace *Jenie Net.* můžeme vidět na obr. 59. Zde je možné příslušným tlačítkem vybrat typ bezdrátové sítě, kterou chceme vizualizovat či ovládat, popř. volba možnosti inicializace modulu.



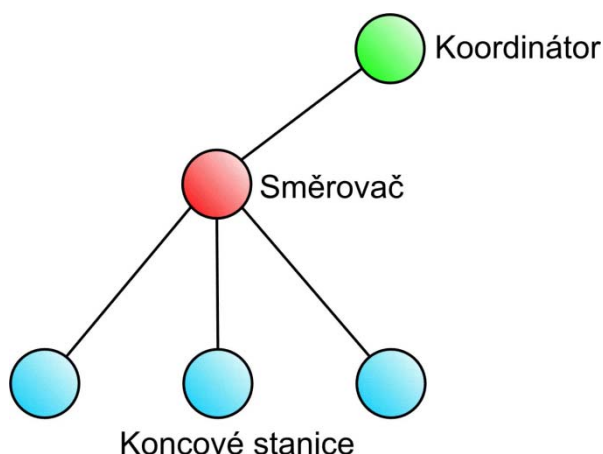
Obr. 59 Úvodní obrazovka aplikace *Jenie Net.*

V dalších kapitolách budu podrobněji rozebírat své vlastní vytvořené bezdrátové senzorové sítě a to nejen z pohledu bezdrátových modulů, ale také z pohledu aplikace *Jenie Net*.

11.1 Sít' ATJenie

Tato síť byla vytvořena pro možnost ovládání bezdrátových modulů a jejich periférií pomocí AT příkazů. Síť má pevně definovanou strukturu, tedy počet bezdrátových stanic v topologii strom. Moduly byly programovány pro příjem AT příkazů od uživatele, který může bezdrátově nejen každou stanicí konfigurovat (připojení do sítě, odpojení, spánkový režim apod.) přímo z koordinátoru sítě, ale může rovněž ovládat libovolné hardwarové prostředky na řídicích či senzorových deskách. Pro ovládání celé této navržené sítě má *Jenie Net*. aplikace záložku senzorová síť - *ATJenie*. Každá stanice v síti (koordinátor, směrovač nebo koncová stanice) je programována individuálně, protože v síti zastává určitou funkci.

Koordinátor a směrovače mají funkci tzv. FFD (Full Functional Device), neboli zařízení s plnými funkcemi a koncové stanice jsou ve funkci RFD (Reduced Functional Device), tedy jako zařízení s omezenými funkcemi. Schéma sítě a počet stanic, ze kterých se *ATJenie* skládá, můžeme vidět na obr. 60.

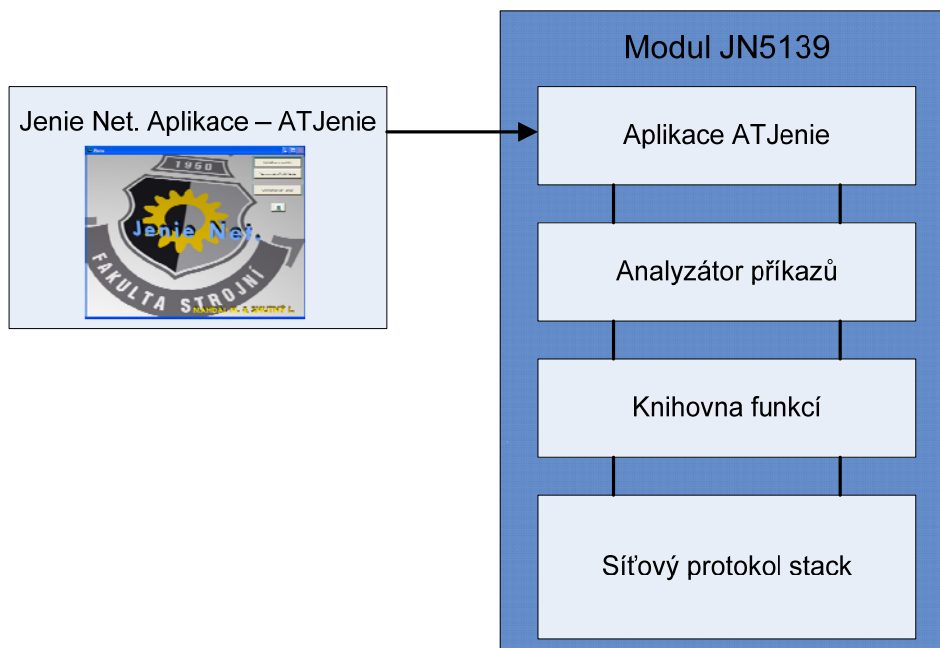


Obr. 60 Ukázka topologie sítě *ATJenie*

Jedná se o obecnou ukázkou celé topologie této sítě, nicméně obrázek spíše naznačuje, z kolika stanic se síť skládá. Koncové stanice totiž nemusí být připojeny přes směrovač, pokud si to vysloveně nepřejeme, ale mohou být připojeny přímo ke koordinátoru sítě.

Hlavním rozdílem mezi vytvořenou sítí *ATJenie* a *Jenie* není jen v typu ovládání, tedy že síť *ATJenie* je ovládána pomocí AT příkazů, ale tato síť má také uživatelskou aplikaci programovanou na straně PC v aplikaci *Jenie Net*. Odtud jsou odesílány příkazy pro konfiguraci bezdrátových modulů, připojování k ostatním modulům sítě apod. Na straně bezdrátového modulu je pak naprogramována aplikace, která je schopna odesílané příkazy přijímat a za pomoci příkazového analyzátoru je překládat do *Jenie API* funkcí, které komunikují se sítíovou vrstvou (stack vrstvou), potažmo umožňují ovládat periferie

senzorových a řídicích desek. Na obr. 61 můžeme vidět jak je koncipována softwarová struktura sítě *ATJenie* na modulu JN5139 a připojení k *Jenie Net.* aplikaci.

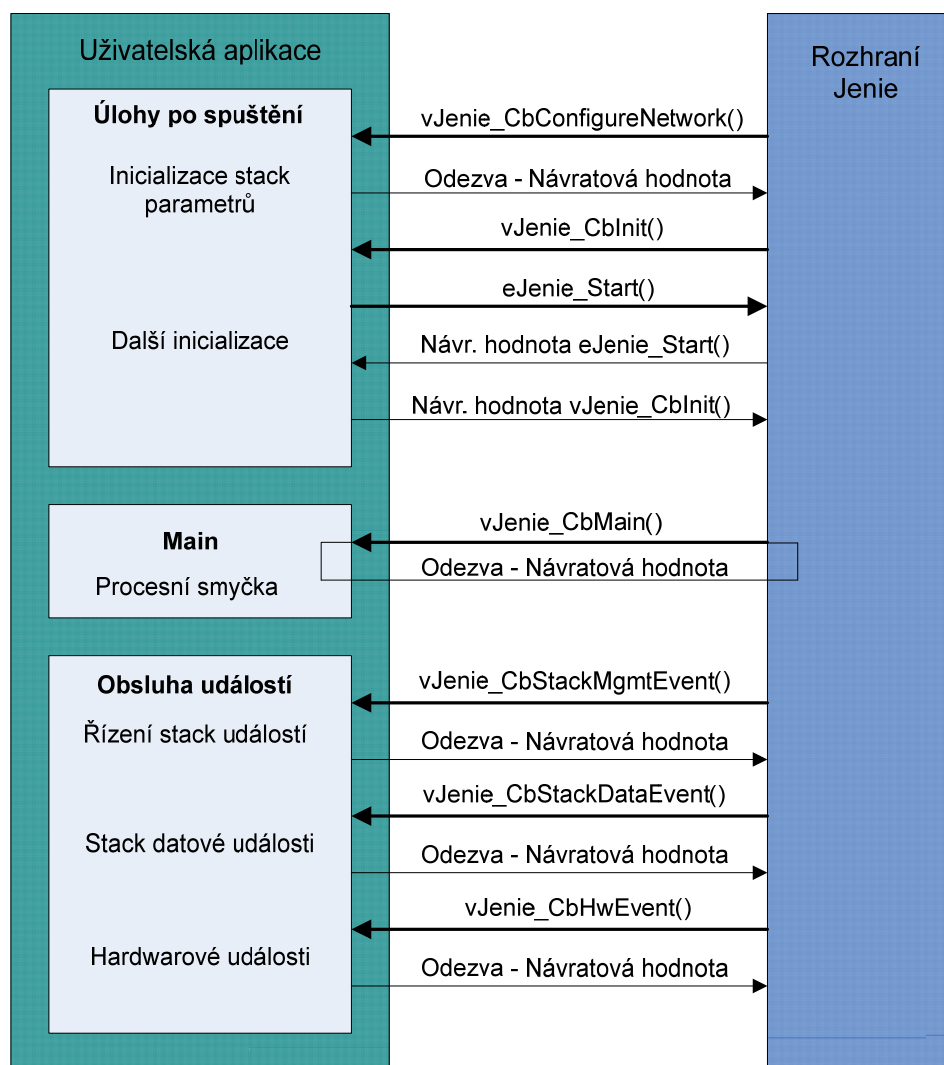


Obr. 61 Připojení *Jenie Net.* Aplikace - sítě *ATJenie* k aplikaci bezdrátového modulu

Z *Jenie Net.* Aplikace, záložky pro síť *ATJenie* je možné odesílat AT příkazy pro ovládání periférií bezdrátového modulu, senzorových a řídicích desek, provádět nastavení modulů, síťové spojení apod. Tato funkční část bude průběžně popisována.

11.1.1 Základní funkční struktura kódu bezdrátových modulů

Jak již bylo uvedeno dříve, uživatelská aplikace komunikuje s *JenNet* vrstvou přes rozhraní *Jenie*. Ukážeme si jak vypadá základní struktura kódu uživatelské aplikace, která je stejná pro všechny síťové typy bezdrátových modulů, tedy pro koordinátor, směrovač a koncovou stanici. Tuto základní funkční strukturu můžeme vidět na obr. 62.



Obr. 62 Přehled základní funkční struktury kódu aplikace

Obrázek ukazuje z jakých funkcí a jak komunikuje uživatelská aplikace s rozhraním *Jenie*. Všechny uvedené funkce musí uživatelská aplikace obsahovat, protože jsou nezbytné pro správnou funkci celé sítě, potažmo bezdrátového modulu. Jedná se o funkce, kterými uživatelská aplikace prochází po zapnutí bezdrátového modulu. Hlavní funkcí je funkce *Main()*, která je volána cyklicky. Pokud se jedná o teplý start modulu, pak není volána funkce pro síťovou konfiguraci *vJenie_CbConfigureNetwork()*. Pro síť *ATJenie* je uvedená funkční struktura kódu spolu s dalšími funkčními celky AT příkazů programována do modulu jako aplikace *ATJenie*. V disertační práci nebudeme rozebírat veškeré kódy pro bezdrátové moduly ani pro vytvořenou aplikaci *Jenie Net.*, uvedeme si pouze důležité funkční celky.

11.1.2 AT příkazy

Pokud jsou bezdrátové moduly programovány binárními soubory pro síť *ATJenie* z příloženého DVD k této práci, budou bezdrátové moduly a potažmo bezdrátová síť ovládána AT příkazy, které jsou programovány pro vykonávání specifických funkcí. Než si ukážeme o jaké AT příkazy a funkce se jedná, podíváme se na složení takového AT

příkazu. Většina AT příkazů má své parametry, které musí být spolu s příkazem odeslány do modulu. Struktura AT příkazu vypadá následovně:

<příkaz>, <parametry nebo data>, <kontrolní hodnota> <CR><LF>

Příkaz se skládá ze tří abecedních písmen (A-Z). Parametry příkazu jsou závislé na samotném příkazu a každý parametr musí být oddělený čárkou. Parametry mohou být zadávány ve dvou číselných soustavách a to v hexadecimální nebo desítkové. Jako výchozí soustava je nastavena desítková soustava. I v této soustavě lze zapsat hodnotu parametrů v hexadecimálním tvaru, ovšem každá hodnota musí mít před sebou uvedený znak „x“. Pokud je vybrána jako výchozí soustava hexadecimální, pak znak „x“ nemusíme logicky zapisovat, ale pokud chceme zapsat parametr v desítkové soustavě, je nutné uvést před parametr písmeno „d“. V případě odesílání dat je hexadecimální hodnota vyjádřena jako sudý počet hexadecimálních číslic, které nemají uváděný prefixový znak „x“. Jestliže jsou data přenášena jako řetězec znaků, pak každý přijatý znak je dekodován jako dvě hexadecimální číslice.

Kontrolní hodnota udává, zda je příkaz v pořádku či nikoliv. Je to kontrola všech znaků operací XOR. Kontrolovány jsou také znaky čárky a mezery. Tato hodnota je volitelná a nemusí být přímo součástí celého příkazu. Hodnotu přepočítává *AT-Jenie* příkazový analyzátor, který je součástí *Jenie* softwaru a jeho úkolem je překládat příchozí AT příkazy do *Jenie API* funkcí, které jsou tímto způsobem volány. Naopak musí být příkazový analyzátor schopen přiřadit jednotlivé API funkci správný AT příkaz. Za každým odeslaným příkazem následují ukončovací znaky s návratem na začátek řádku (0x0D) spolu s odřádkováním (0x0A).

Pro deklaraci příkazů a parametrů se používají makra. Ještě před samotnou deklarací příkazů musí být deklarovány parametry příkazu. Uvedeme si příklad deklarace příkazu pro měření napětí akumulátorů napájejících bezdrátový modul. Aby to bylo jednodušší, tak tento příkaz nemá žádné parametry (nejsou deklarovány). Každý AT příkaz s odpovídající funkcí v kódu bezdrátového modulu vypadá následovně:

Deklarace příkazu pro měření napětí akumulátorů:

```
PRIVATE tsATJCommandSet asATJPlatformCommandSet = {  
    ATJ_BEGIN_COMMAND_SET  
    ATJ_COMMAND_NP(BGV, i32GetBoardVoltage,  
                    E_ATJ_OKP, bGetBoardValue_Validator),  
    ATJ_END_COMMAND_SET  
};
```

Popis:

ATJ_BEGIN_COMMAND_SET - makro začínající nastavení příkazových definic.

ATJ_END_COMMAND_SET - makro ukončující sadu příkazových definic.

ATJ_COMMAND_NP(a, b, c, d) - makro pro definici příkazu (příkazu BGV). Parametr makra *a* označuje AT příkaz pro měření napětí akumulátorů (BGV), *b* je jméno volané funkce, kterou AT příkaz volá (*i32GetBoardVoltage*), *c* označuje typ odpovědi (odpověď modulu do aplikace *Jenie Net.* bude OKP – OK s vnějším parametrem), která bude generována po vykonání příkazu a konečně parametr *d* označuje ověření úspěšnosti vykonané funkce (*bGetBoardValue_Validator*). Jedná se o funkci, která testuje, zda byla vykonaná funkce *i32GetBoardVoltage()* úspěšná a měřená hodnota není záporná.

Samotná funkce *i32GetBoardVoltage()* vypadá následovně:

```
PRIVATE int32 i32GetBoardVoltage(void)
{
    uint16 u16AdcReading;
    int32 i32VoltsReading = 0;
    volatile uint32 u32Timeout = 0;

    vInitADC(E_AHI_ADC_SRC_VOLT); //Inicializace ADC kanalu
    vAHI_AdcStartSample(); //zahajeni mereni

    while (bAHI_AdcPoll()) { //testovani cinnosti ADC prevodniku
        if (ADC_TIMEOUT == u32Timeout++) {
            i32VoltsReading = -1;
            break;
        }
    }
    if (-1 != i32VoltsReading) //prevodnik neni zaneprazdnen cinnosti, muze prevadet
    {
        u16AdcReading = u16AHI_AdcRead(); //cteni ADC kanalu
        i32VoltsReading = ((uint32)((uint32)(u16AdcReading * 586) +
            ((uint32)(u16AdcReading * 586) >> 1))) /
            1000; //prevod na napeti v mV
    }
}
```

Tato funkce měří hodnotu z A/D převodníku a převádí ji na napětí, které je v milivoltech. Ve funkci nechybí testování stavu převodníku, zda vykonává činnost

převodu, či nikoli. AT příkaz, který byl dříve deklarován, je ještě nutné zavést do analyzátoru příkazů. K tomu nám slouží funkce:

```
vATJ_ParserAddCommands(&asATJPlatformCommandSet);,
```

kde parametr funkce *&asATJPlatformCommandSet* představuje adresu struktury obsahující nový příkaz BGV (viz předchozí deklarace příkazu). Tady se samozřejmě jedná o celou sadu příkazů a AT příkaz BGV je pouze jeden z nich. Před použitím každého AT příkazu musíme ještě příkazy povolit, což provedeme funkcí:

```
vATJ_ParserSetCommandEnable(&UartChannel,"BGV",TRUE);.
```

Prvním parametrem této funkce je adresa UART komunikačního portu, který je přístupný pro analyzátor příkazů, druhý parametr představuje AT příkaz a poslední, zda je příkaz povolen či zakázán. Příkaz může být povolen také pro tzv. tunelové spojení (bude popsáno dále), kterým je realizováno spojení bezdrátových modulů v síti *ATJenie*, což je další charakteristický rys pro tento typ vytvořené sítě. Funkce povolující možnost využívání AT příkazu BGV při tunelovém spojení mezi bezdrátovými moduly vypadá následovně:

```
vATJ_TunnelSetCommandEnable("BGV",TRUE);.
```

Parametry této funkce asi není potřeba popisovat. To jak samotné funkce vypadají, zde nebudeme uvádět, protože se jedná o rozsáhlejší kód, který nebude uživatel programující další AT příkaz potřebovat. Pokud bude vytvářet nový AT příkaz, pak postačí postupovat dle tohoto návodu, a tedy novému AT příkazu přiřadit patřičnou volanou uživatelskou funkci (ta je již na samotném uživateli).

Z aplikace *Jenie Net*. Záložky *ATJenie* pak stačí odeslat vytvořený AT příkaz (BGV) do bezdrátového modulu a ten zahájí měření napětí napájecích akumulátorů bezdrátového modulu. Příkaz s parametry by ještě navíc obsahoval za AT příkazem parametry, popř. přenášená data. Např. AT příkaz SND, který odesílá data do jiného modulu, vypadá následovně:

SND, x00158D0000068515, 250, 1, 1

Popis parametrů SND příkazu je uveden v příloze IV, která zobrazuje seznam programovaných a použitých AT příkazů pro bezdrátové moduly.

Odpověď od bezdrátového modulu typu OKP je vždy doplněna měřenou či vypočtenou hodnotou (např. OKP3000). Odpověď typu OK je přenášena bez hodnoty, stejně jako ERR (Error) při vzniklé chybě. Odpověď typu PKS znamená úspěšné odeslání paketu a PKF, že paket nebyl odeslán. Odpověď typu SRR má parametry adresy vzdáleného modulu a registrované služby. RSR je pak odpověď při registraci služby. BSY znamená, že modul je zaneprázdněn a neodpovídá. NTU říká, že síť byla aktivována a modul byl připojen do sítě.

Některé AT příkazy, jako například příkaz vypočítávající rozptyl z měřených dat, má výpočet programován na straně *Jenie Net*. aplikace a AT příkaz slouží pouze pro

zjištění průměrné hodnoty, která je k výpočtu důležitá. Tímto se šetří výpočetní čas a také místo v paměti mikroprocesoru.

11.1.3 Inicializace a konfigurace bezdrátových modulů

Jenie Net. aplikace má naprogramovány funkce, které umožňují inicializovat a konfigurovat bezdrátové moduly pro připojení do sítě s určitou funkcí, kterou pak v síti zastávají (koordinátor, směrovač, koncová stanice). Okno sloužící k inicializaci a konfiguraci modulů můžeme vidět na obr. 63 a v *Jenie Net.* jej najdeme pod záložkou (tlačítkem) *Inicializace modulu*, viz obr. 59.



Obr. 63 Okno pro inicializaci a konfiguraci bezdrátových modulů

V pravé části okna můžeme vybrat funkci, kterou bude modul v síti zastávat a tlačítkem OK dojde k potvrzení volby a následné konfiguraci modulu. V této fázi jsou odesílány AT příkazy pro konfiguraci, viz příloha IV. V této sekvenci: CFG, INI, STR pro koordinátor a směrovač. Pro koncovou stanici je sekvence trošku odlišná, je tady navíc příkaz CFP volaný těsně po příkazu CFG, který nastavuje síťové parametry pro tuto stanici.

Po inicializaci modulu jsou nastavené hodnoty uloženy pomocí příkazu SCN. Hodnoty jsou uloženy pro směrovač a koncovou stanici, aby při příštím zapnutí modulu či jeho resetu nemusel být opět inicializován. Koordinátor hodnoty uloženy nemá, protože musí být vždy připojen k PC a teprve po jeho inicializaci a konfiguraci síťových parametrů je založena bezdrátová síť a lze vstoupit do sítě *ATJenie*.

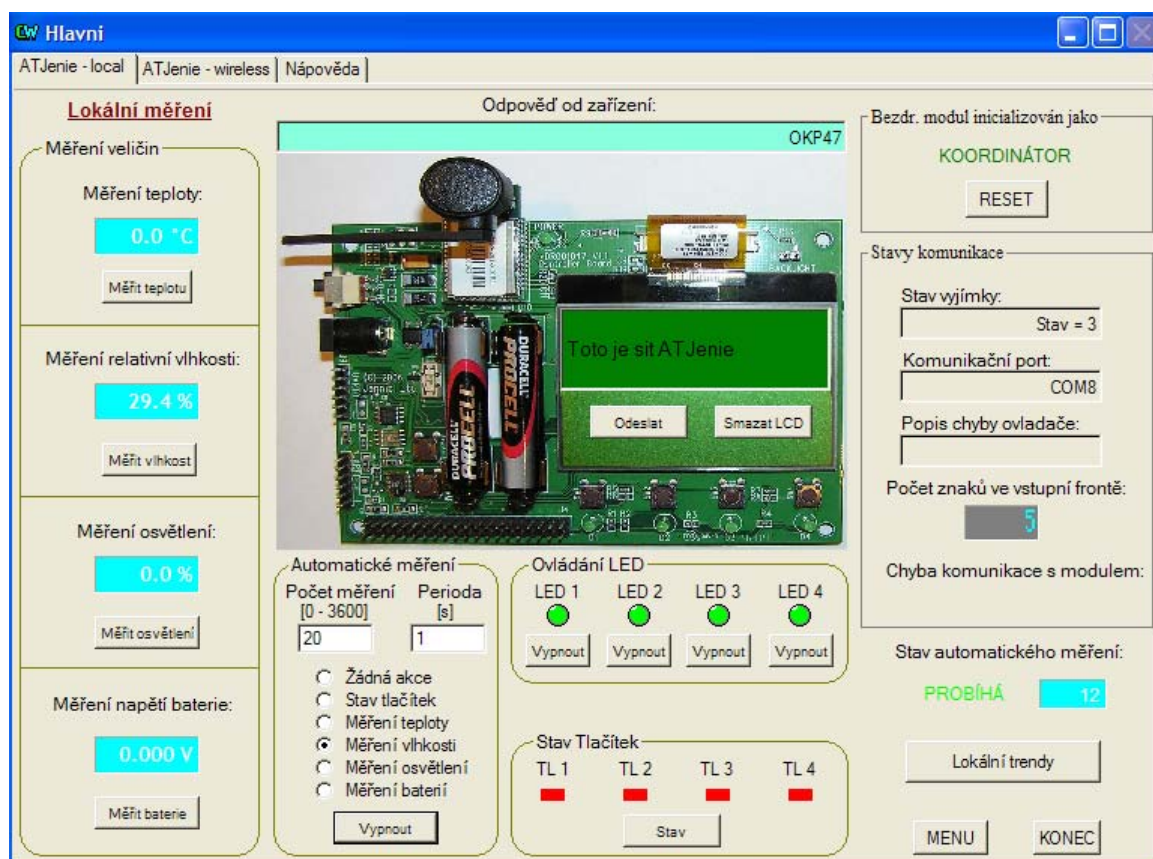
Tlačítkem *Nastav COM port* je možné za chodu aplikace změnit sériový komunikační port. Tato možnost je zde přidána proto, že každé zařízení, potažmo bezdrátový modul je v systému Windows inicializován pod určitým COM portem, který je dán instalací ovladače k USB kabelu. Kabel je zároveň převodníkem na TTL logiku pro bezdrátový modul. Takže při použití stejného kabelu můžeme připojit libovolný bezdrátový modul a provést inicializaci a konfiguraci síťových parametrů bez změny

komunikačního portu. Pokud použijeme jiný kabel, pak právě tlačítkem pro nastavení COM portu není problém změnit komunikační port za chodu aplikace *Jenie Net.*, aniž bychom museli port složitě nastavovat v systému Control Web. Levá část okna *Inicializace* nás informuje o stavu komunikace s bezdrátovým modulem včetně výpisu chyb, které by případně mohly při inicializaci a konfiguraci nastat.

Nastavení bezdrátových modulů, které bylo popsáno v této podkapitole, se týká pouze modulů operujících v předem definované senzorové síti *ATJenie*.

11.1.4 Lokální a bezdrátové měření dat

Velmi často se setkáváme s potřebou, kdy nechceme měřit a sbírat data bezdrátově z několika stanic současně, ale vystačíme si s jedním zařízením, které je schopné přenášet data přímo do PC (aplikace *Jenie Net.*) kabelově. V našem případě přes USB s emulací sériového COM portu. Pro tento případ síť *ATJenie* nabízí možnost lokálního měření pod záložkou *ATJenie - local*. Jedná se o měření veličin a ovládání hardwarových periférií na senzorové nebo řídicí desce s bezdrátovým modulem inicializovaným a konfigurovaným jako koordinátor sítě. Na obr. 64 můžeme vidět okno pro lokální měření veličin a ovládání periférií na řídicí desce.



Obr. 64 Okno pro lokální měření veličin sítě *ATJenie - local*

V okně lokálního měření lze provádět měření vybraných veličin jako teplota, relativní vlhkost, osvětlení a napětí napájecích akumulátorů na dotaz, což šetří výrazným způsobem kapacitu akumulátorů, nebo automaticky. Při měření na dotaz je odeslán AT

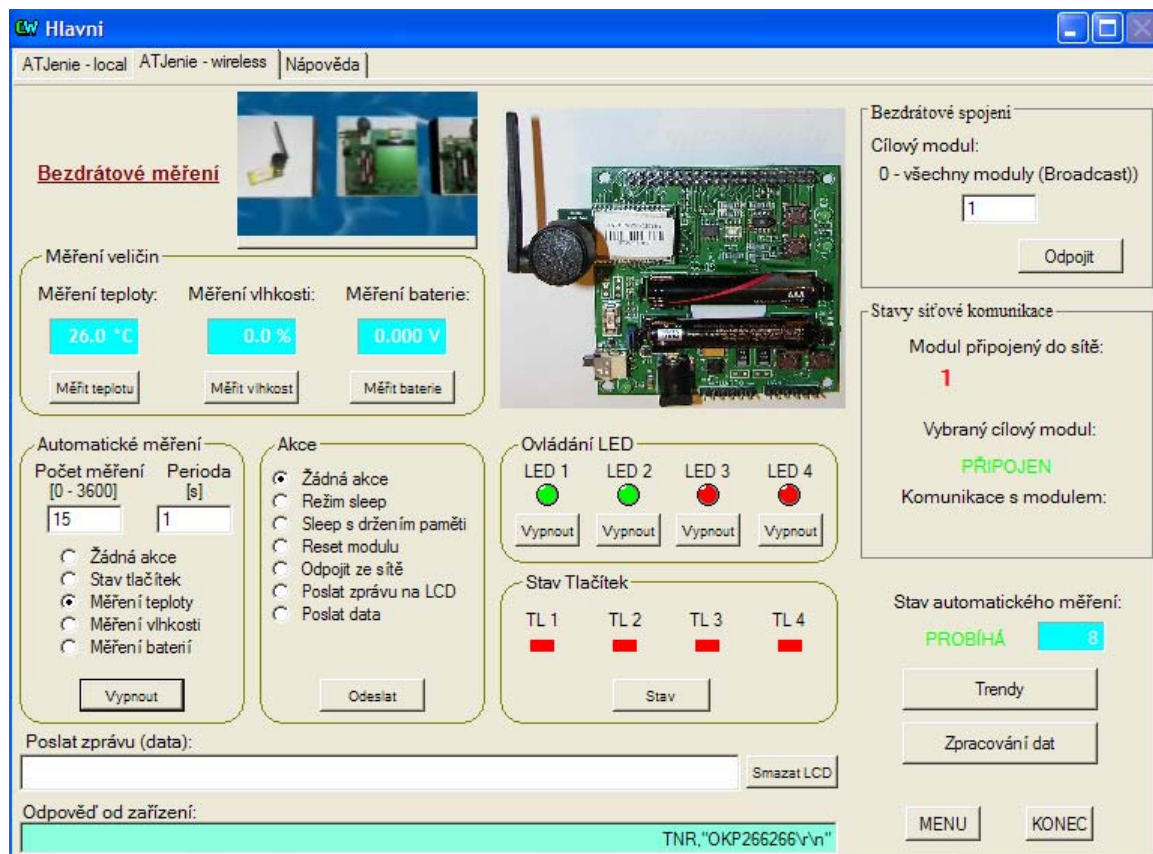
příkaz do modulu, s požadavkem měření zvolené veličiny. Poté je odeslána odpověď zpět do aplikace. Automatické měření odesílá AT příkazy do modulu cyklicky. Uživatel si vybere, jakou veličinu chce měřit, zadá počet měření, které je softwarově omezeno na hodnotu 3600, což odpovídá při frekvenci vzorkování 1 Hz délce jedné hodiny záznamu. Tuto hodnotu lze softwarově jednoduše změnit do maximální hodnoty dané datovým typem long integer o velikosti 4 Byte. Dále uživatel zadá periodu vzorkování, která může být pouze rovna nebo větší jak 1 se stejným omezením a možnou budoucí úpravou jako pro počet měření. Tlačítkem *Zapnout/Vypnout* se zahájí nebo ukončí automatické měření. Touto volbou můžeme také kromě měření veličin zjišťovat stavy tlačítek. To lze rovněž provádět na dotaz přes tlačítko *Stav*. V okně nechybí ani ovládání LED diod a možnosti odeslání zprávy na LCD displej desky s bezdrátovým modulem. V pravé části okna je zobrazen název modulu, tedy jak byl inicializován a nakonfigurován (koordinátor, směrovač, koncová stanice), včetně zobrazení stavu komunikace s bezdrátovým modulem stejně jako tomu bylo u inicializace a konfigurace modulu. Tlačítko *RESET* slouží pro resetování modulu, v případě že došlo ke komunikační chybě nebo nastala nějaká neočekávaná událost na modulu. Dále je tady uveden stav automatického měření, zda probíhá a kolik měření již bylo provedeno. Tlačítkem *Lokální trendy* si zobrazíme hodnoty měřených veličin v grafech, viz obr. 65, popř. tlačítkem *Přístup k datovým souborům* se můžeme přepnout do prohlížení dat, tedy do výpisu měřených hodnot.



Obr. 65 Lokální měření veličin – zobrazení trendů měření

Tlačítko *Menu* slouží pro návrat do hlavního menu k výběru typu sítě a inicializace modulu.

Druhá možnost měření veličin a pro nás významnější, je měření veličin bezdrátové. Jedná se o záložku *ATJenie - wireless*, která nabízí měření vybraných veličin v síťové topologii, která je uvedena na obr. 60. Síť je složena z pěti modulů včetně koordinátoru sítě. Jeden z modulů ve funkci koncové stanice je modul se solárním napájením popsany v kapitole 6.5. Okno pro bezdrátové měření veličin můžeme vidět na obr. 66.



Obr. 66 Okno pro bezdrátové měření veličin a ovládání modulů v síti - *ATJenie - wireless*

Koncepčně jsou funkce obdobné jako pro lokální měření, což lze vypožorovat i grafickým provedením pro obě metody měření. Hlavním rozdílem je možnost připojení na vzdálené moduly, což se provádí pomocí tunelového spojení. Jedná se o vytvoření komunikačního tunelu mezi zvolenými moduly, což ve skutečnosti znamená spojení registrovaných služeb. Tunelové spojení je popsáno v kapitole 11.1.7.

Tlačítkem *Připojit* dojde k odeslání série AT příkazů (TCN, TCM s parametry) pro zajištění tunelového spojení mezi koordinátorem a jednotlivými moduly sítě. Po připojení každého modulu ke koordinátoru (do sítě) je zobrazeno číslo daného modulu, tedy 1, 2, 3, 4, přičemž modul s číslem 1 je konfigurován jako směrovač a prodlužuje vzdálenost mezi koncovými stanicemi a koordinátorem. Uživatel má možnost připojit se tunelovým spojením ke každému modulu zvlášť nebo vyslat tzv. broadcast zprávu pro připojení všech bezdrátových modulů. Informaci o správném připojení modulu nám také podává textová hláška o připojení a zprávy o komunikaci s modulem, popř. odpověď od zařízení. Stejně jako tomu bylo u lokálního měření, tak i zde je možnost po připojení k libovolným modulům nebo všem modulům měřit teplotu, relativní vlhkost, napětí napájecích

akumulátorů, zjišťovat stav tlačítek či ovládat LED diody na senzorových deskách. Měřit lze na dotaz nebo automaticky se zadáním počtu měření a periody měření.

Výjimku tvoří programované akce. Mezi ně patří příkaz (SSP) pro uvedení koncových stanic do spánkového režimu „sleep“ s přednastavením periody spánku a aktivním časováním. Tedy pokud modul vysílá každých např. 5 sekund, musí mít nastavená perioda spánku nižší hodnotu jak 5. Perioda spánku se zadává v sekundách a je přepočítána na milisekundy. Příkazem SLP je modul uveden do režimu spánku aktivním časováním a držením paměti modulu, což výrazným způsobem šetří energii napájecích akumulátorů. Jako další akce je vzdálený reset připojeného modulu, nebo odpojení modulu ze sítě. V případě, že bezdrátový modul je připojen do řídicí desky, máme možnost bezdrátově odeslat zprávu na LCD displej. Obsah funkce programované v *Jenie Net.*, odesílající zprávu na LCD vypadá následovně:

```

if pocetWireless < 40 then      (*kontrola pocetu zadanych znaku*)
    while i < pocetWireless do
        LCDDecimal[i] = ord(WLCDInputString); (*prevede znak na dek. cislo*)
        LCDReal[i] = LCDDecimal[i];    (*pretypovani longcard na real*)
        LCDString[i] = str(LCDReal[i],16); (*prevedeni do hex soustavy - na string*)

        LCDOutputString = concat( LCDOutputString, LCDString[i] ); (*pripojeni
                                                                    retezcu*)
        LCDInputString = delete( LCDInputString, 0, 1 ); (*odstraneni znaku*)
        i = i + 1;      (*posun na dalsi znak*)
        LCDOutputString = ltrim(LCDOutputString); (*odstrani mezery z retezce*)
    end;

    if WSwitchAutoMes[3] = true then    (*kontrola pripojeni modulu*)
        SendString1 = concat('TCM,"BTX,', LCDOutputString );(*retezec pro
                                                                odeslani na LCD displej*)
        SendString2 = concat( SendString1, ',0,0"'); (*pripojeni radku a sloupce*)
        core.DriverQueryProc( 'drv', 'SendStringSync', SendString2 );
        (*odeslani*)
    end;

else

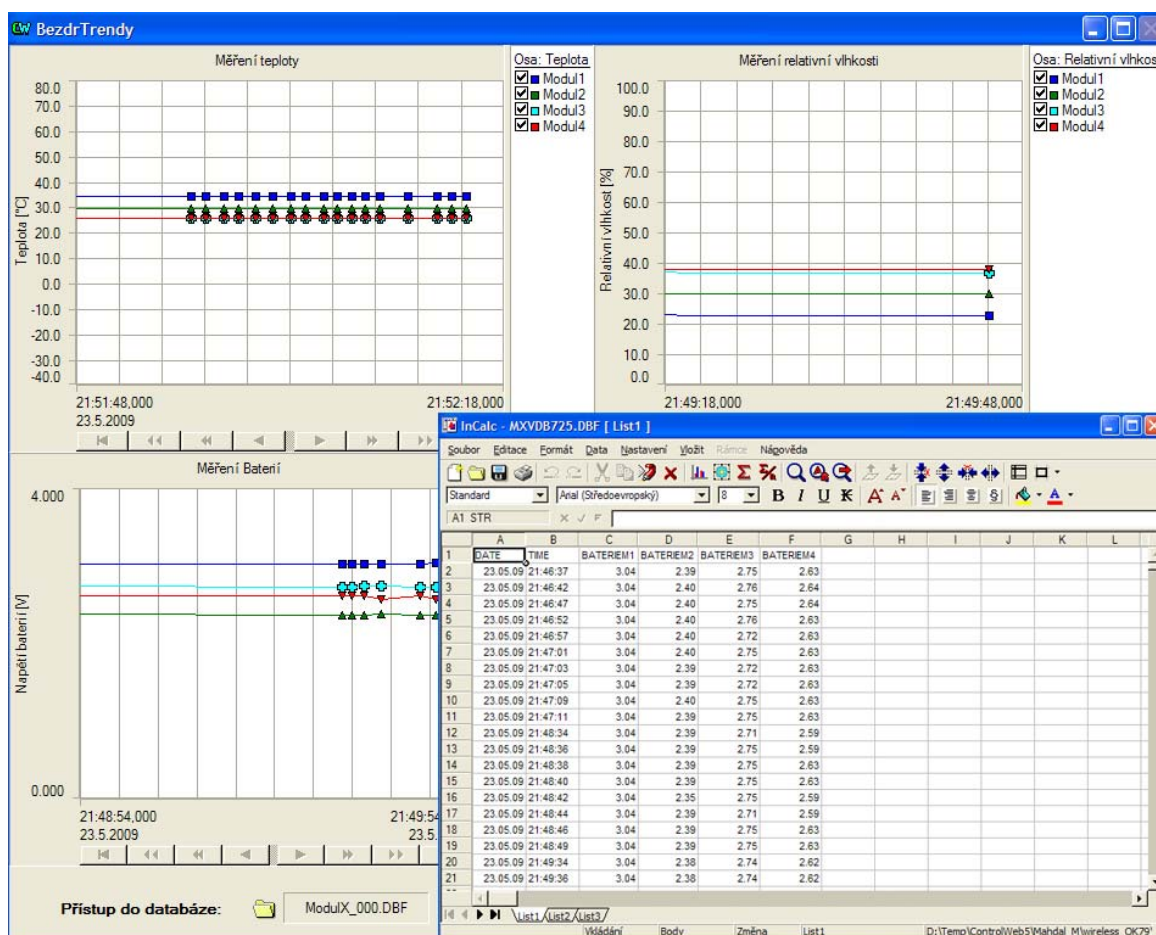
    W_string_control_9.SetValue(""); (*vymazani vepsaneho retezce*)
    Hlaseni_2.Show();                (*hlaska o prekročení limitu znaku*)
    Hlaseni_2.Ascend();              (*zobrazení hlasky do popředí*)

end;
```

Z kódu je vidět, že maximální počet zadaných znaků řetězce je omezen na 39, včetně speciálních znaků i mezer. Tato ukázka části kódu byla vložena i pro představu způsobu programování a syntaxe programovacího jazyka v systému Control Web.

Velmi užitečnou funkcí je také možnost odeslání dat do vzdáleného modulu. V tomto případě může uživatel přijímat data z měření, které mohlo probíhat na jakémkoliv modulu v síti a koordinátor tato data přeposílá na zvolený modul. Tlačítkem *Odpojit* je odeslán AT příkaz TCL, čímž se ukončí tunelové spojení mezi koordinátorem a daným modulem, resp. moduly.

Tlačítko *Trendy*, stejně jako v případě lokálního měření slouží k zobrazení průběhů měřených veličin, viz obr. 67. Ovšem v tomto případě je nutné, aby u každého trendu bylo možné zvolit, z jakého modulu chceme data zobrazovat.



Obr. 67 Zobrazení trendů bezdrátového měření veličin s výpisem hodnot z databáze

Tlačítkem *Přístup k datovým souborům* se zobrazí trendy měřených veličin s možností přepnutí zobrazení do datového výpisu naměřených hodnot pro každý modul. Veškerá příchozí data jsou ukládána do databáze s příponou *.MDB, které lze prohlížet přes zobrazovanou složku s názvem *Přístup do databáze*.

11.1.5 Identifikace modulů v síti

Každý modul v bezdrátové síti je identifikován pomocí MAC adresy. Pokud v *ATJenie* síti používáme tunelové spojení, pak vznikne mezi koordinátorem a vzdáleným modulem vazba, u které již nemusí vzdálený modul odesílat s každými odchozími daty informaci o MAC adrese tohoto modulu. Jednalo by se o redundantní informaci, obzvláště při spojení pouze dvou modulů (koordinátoru a libovolné koncové stanice nebo směrovače).

Proto byla vytvořena bitová identifikace. Tzn., že každý bezdrátový modul *ATJenie* sítě má přidáno do přenášených dat (do měřené veličiny) další bity, které tento modul identifikují. V programovém kódu mikroprocesoru bezdrátového modulu, který je 32-bitový, jsme schopni operovat s daty do velikosti 4 Byte. Takže máme dost prostoru na to, abychom bitově identifikovali nejen modul, ale také jakou veličinu právě měříme. Ukážeme si příklad bitové identifikace bezdrátového modulu, tak jak jsou data odeslána a přijímána v *Jenie Net.* aplikaci pro síť *ATJenie*.

Na straně bezdrátového modulu je k měřené veličině přidána identifikace modulu a identifikace snímače součtem bitů.

Tab. 10 Identifikace bezdrátových modulů a měření

Identifikace modulů				
Označení modulu	Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4
Identifikace modulu - vyjádřeno dekadicky	4096	8192	16384	32768
Identifikace modulu - vyjádřeno binárně	00010000/ 00000000	00100000/ 00000000	01000000/ 00000000	10000000/ 00000000
Identifikace měřené veličiny (snímače)				
Typ měření či jiná akce	Měření napětí akumulátorů	Měření relativní vlhkosti	Měření teploty	Zjištění stavu tlačítek
Dekadicky	65536	131072	262144	196608
Binárně	00000001/ 00000000/ 00000000	00000010/ 00000000/ 00000000	00000100/ 00000000/ 00000000	00000011/ 00000000/ 00000000

Z tabulky je vidět, že prvních 12 bitů zprava v identifikaci modulu a typu měření je vyhrazeno pro přenášenou hodnotu měřené veličiny (hodnotu z 12-bitového převodníku). Zbylé bity ve druhém Byte pak identifikují moduly v síti. Třetí Byte je vyhrazen pro identifikaci měřené veličiny a čtvrtý je nevyužitý. Pro síť *ATJenie*, která je předem definovaná, co se týká do počtu bezdrátových modulů, vystačí identifikace pomocí 4 horních bitů ve druhém Byte. Samozřejmě že pro větší síť by mohl být pro tuto identifikaci využíván 4 Byte a podle velikosti přenášených hodnot také celý druhý Byte.

Na straně bezdrátového modulu se tedy hodnoty z tabulky binárně sečtou (resp. možné i dekadicky) tzn., sečte se hodnota identifikující modul, hodnota identifikující měřenou veličinu a nakonec ještě změřená hodnota veličiny (např. hodnota teploty).

Na straně *Jenie Net.* aplikace se odeslána hodnota dekóduje za pomoci binárního násobení, které si můžeme ukázat na tomto příkladu:

$A = 72732_D$ - příchozí hodnota z bezdrátového modulu dekadicky

Identifikace bezdrátového modulu:

	10001110000011100	příchozí hodnota z bezdrátového modulu binárně
	& 01111000000000000	binární násobení s hodnotou 61440 _D
B =	00001000000000000	identifikace modulu 1 (4096 _D)

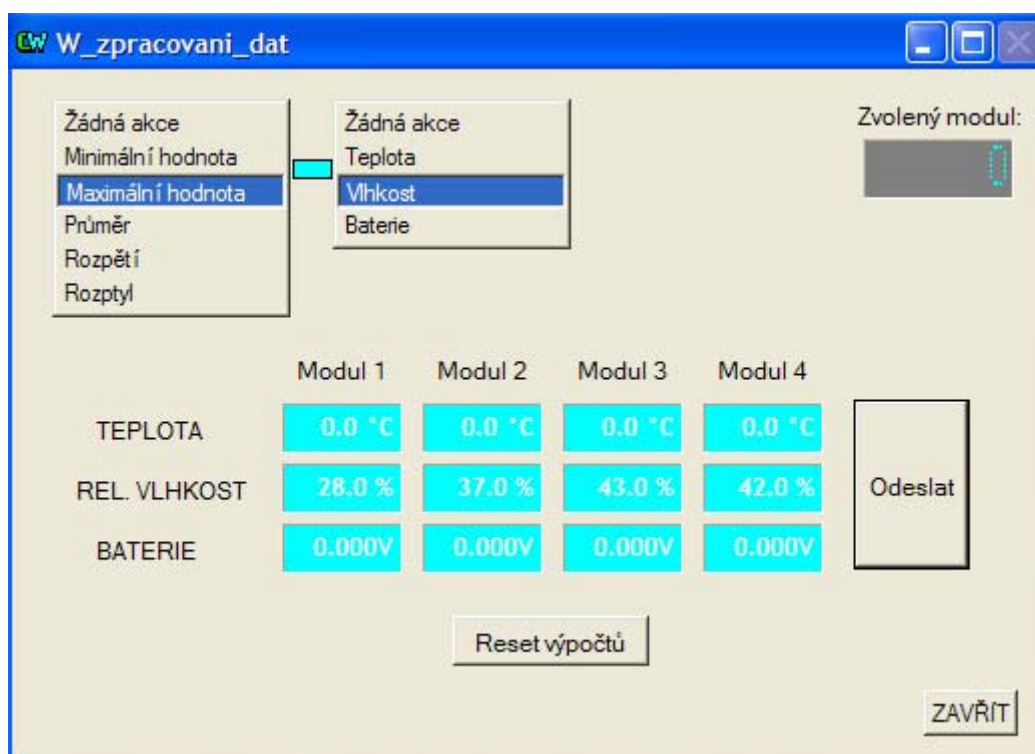
Identifikace měřené veličiny či prováděné akce:

	00010001110000011100	příchozí hodnota z bezdrátového modulu binárně
	& 1111000000000000000	binární násobení s hodnotou 983040 _D
C =	0001000000000000000	identifikace měření napětí akumulátorů (65536 _D)
$D = A - B - C = 3100 \text{ mV}$		naměřená hodnota napětí akumulátorů na modulu 1

11.1.6 Úprava a zpracování měřených dat

Všechna přijatá data musí být upravena a vhodně převedena na správné fyzikální jednotky. Některé hodnoty jsou převedeny již bezdrátovým modulem a některé jsou upraveny přímo v aplikaci *Jenie Net.* Co se týká měřené teploty, je hodnota odesílána z modulu přímo ve stupních Celsia. V modulu je hodnota z A/D převodníku vhodně přepočtena na hodnotu ve stupních Celsia podle vztahu z kapitoly 5.1. pro snímač teploty. Totéž platí i pro relativní vlhkost, která je vypočtena rovněž vztahem z kapitoly 5.1. Na PC je relativní vlhkost vyjádřena v procentech, stejně jako hodnota osvětlení, která může nabývat hodnoty od 0 do 4015, takže po vydělení 40,15 získáváme procentuální vyjádření této hodnoty. Měřené napětí napájecích akumulátorů je přenášeno jako hodnota v milivoltech, ta je poté upravena v aplikaci na volty.

V aplikaci *Jenie Net.*, síti *ATJenie - wireless*, máme k dispozici tlačítko pro zpracování dat. Toto okno, které se po kliknutí na tlačítko otevře, můžeme vidět na obr. 68.



Obr. 68 Zpracování dat z bezdrátových modulů

Zde může uživatel žádat připojený vzdálený modul nebo všechny moduly o zaslání minimální, maximální hodnoty, vypočteného aritmetického průměru, či rozpětí (rozdíl maximální a minimální naměřené hodnoty) a výběrového rozptylu ze série měřených dat. Pokud zahájíme nové měření a z této série chceme zjišťovat a vypočítávat tyto hodnoty, musíme resetovat výpočty tlačítkem *Reset výpočtů*. Po naměření hodnot buď s definovanou periodou měření, nebo i z měření na dotaz můžeme vybrat akci (zjištění minimální, maximální hodnoty atd.) a veličinu, pro kterou chceme tyto hodnoty zjistit. Tlačítkem *Odeslat* jsou odeslány AT příkazy z přílohy IV pro zjištění požadovaného údaje. Jak jsme si mohli povšimnout, tak v tabulce není uveden AT příkaz pro zjištění rozptylu (výběrového rozptylu) z měřených hodnot. Rozptyl je vypočítáván v aplikaci *Jenie Net.*, kde k jeho výpočtu je potřeba průměrné hodnoty, na kterou se při výběru této akce dotazujeme. Pro výpočet rozptylu z náhodného výběru je použit známý vztah:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (12)$$

kde:

n - počet měření,

X_i - i -tá měřená hodnota,

\bar{X} - výběrový průměr.

Před každým odesláním AT příkazu je v aplikaci kontrolováno, že je skutečně daný bezdrátový modul připojen. Jen tak může být odeslán požadavek na danou akci.

11.1.7 Tunelové spojení mezi bezdrátovými moduly

Již zmiňované tunelové spojení, kterým je realizována vazba mezi moduly v síti *ATJenie* je na každém modulu definována jako služba 32. Tunelovým spojením může aplikace za pomoci programovaných AT příkazů na jednom modulu vzdáleně ovládat jiný modul, resp. přistupovat na jeho hardwarové periferie stejně jako na lokálním modulu (lokálně).

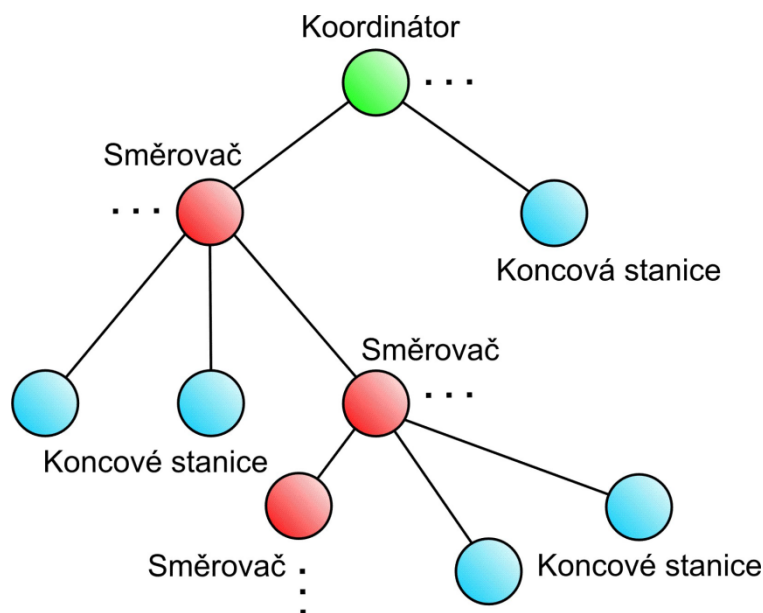
Jedná se o metodu přenosu dat do vzdáleného modulu s využíváním AT příkazů. AT příkaz je obsahem přenášených dat. Poté co obdrží vzdálený modul zprávu (data), rozklíčuje její obsah a vykoná přenášený AT příkaz stejně, jako by tomu bylo lokálně na modulu, od kterého zpráva pochází. Jestliže po vykonání příkazu je generována odpověď na AT příkaz, např. úspěšnost vykonaného příkazu spolu s hodnotou měřené veličiny, pak je stejným způsobem odeslána odpověď zpět na modul, od kterého AT příkaz pochází.

Služba tunelování musí být na každém bezdrátovém modulu v síti povolena a musí mít zároveň stejné označení v profilu služeb (služba 32). Pro vytvoření tunelového spojení využíváme AT příkazy z tabulky, viz příloha IV. V první fázi je potřeba připojit lokální modul na službu 32 na vzdáleném modulu, což provedeme příkazem TCN. Poté příkazem TCM, "TOP" otevřeme komunikační kanál pro tunelové spojení. Pokud vše proběhlo v pořádku, vzdálený modul pošle odpověď a na lokálním modulu je generováno hlášení TNR indikující, že vzdálený modul přijal příkaz o tunelovém spojení. Zároveň tímto odeslal odpověď o vytvořeném spojení. Tunelové spojení pak můžeme ukončit AT příkazem TCL.

11.2 Sít' Jenie

Tato síť byla vytvořena jako další varianta k síti *ATJenie*, nicméně z pohledu funkčnosti sítě tvoří spíše opak k síti *ATJenie*. Název této sítě vzniknul podle rozhraní *Jenie API* (Application Programming Interface), které síť využívá. Síť *Jenie* má sice stejnou síťovou topologii jako *ATJenie*, ale nevyužívá AT příkazů pro řízení sítě a hardwarových prostředků bezdrátových stanic. Navíc při její tvorbě bylo hlavním cílem vytvořit univerzální síť, která bude dovolovat připojit libovolný počet bezdrátových stanic. Tato síť a její prvky v síti jsou programovány pro tvorbu rozsáhlé sítě, pro připojení velkého počtu stanic, které jsou automaticky po jejich zapnutí její součástí. V síti lze adresovat až 65 535 stanic, ovšem skutečné testy hovoří spíše o počtu do 1000 stanic. U takového množství stanic již hovoříme o plošně distribuovaných sítích, které jsou řízeny jedním a to nejvyšším modulem v síti, koordinátorem.

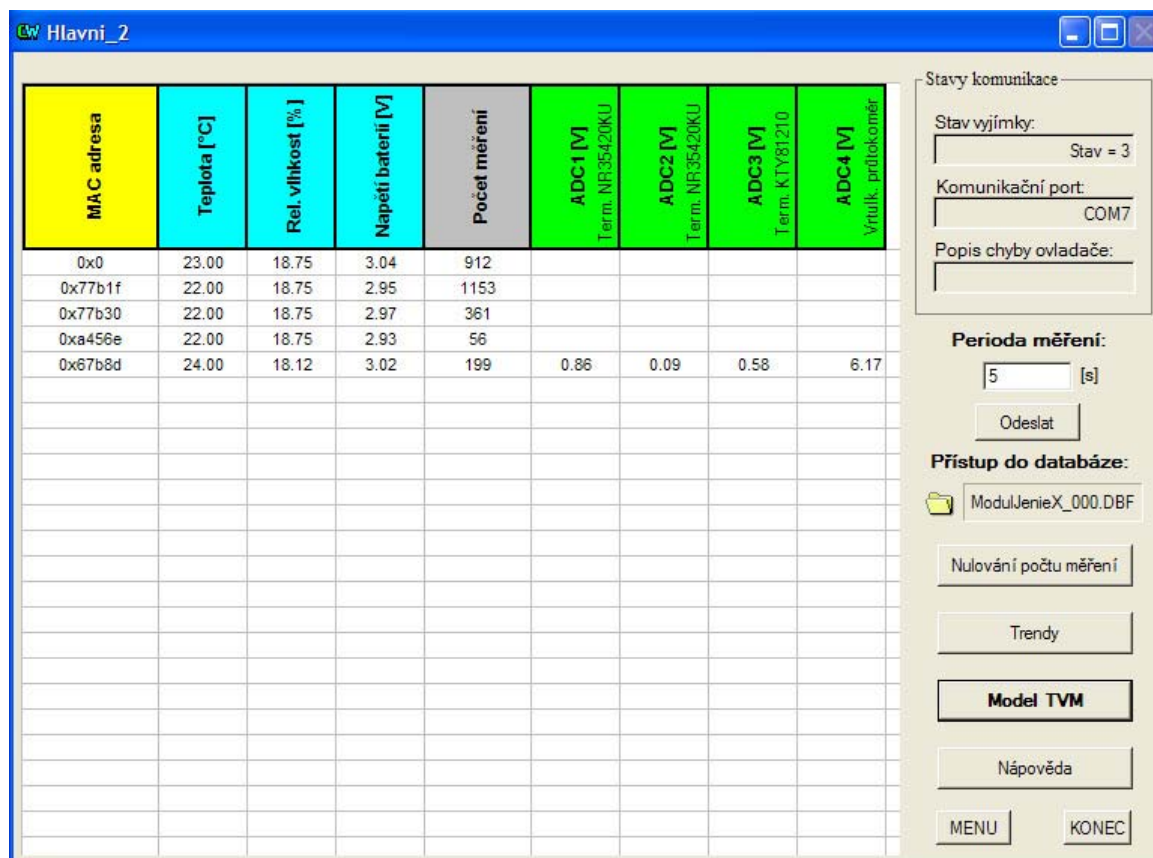
Každá bezdrátová stanice (koordinátor, směrovač, koncová stanice) má svůj programový kód, který na rozdíl od modulů v síti *ATJenie* zajistí po spuštění modulu inicializaci a síťové nastavení bezdrátového modulu. Topologii typu strom, síť *Jenie*, můžeme vidět na obr. 69.

Obr. 69 Stromová topologie univerzální sítě *Jenie*

Moduly zde tvoří rozsáhlou stromovou strukturu až ke koordinátoru sítě. Jednotlivé tečky u koordinátoru a směrovačů naznačují, že k modulu je možné připojit další zařízení (směrovače nebo koncové stanice). Bezdrátové moduly mají naprogramovány algoritmy pro automatické zahájení měření veličin po aktivaci bezdrátového modulu a připojení do sítě.

Vytvořenou softwarovou podporu pro rozsáhlou topologii strom sítě *Jenie* můžeme vidět na obr. 70. Okno na obrázku zobrazuje aktivní měření veličin v roli meteorologické stanice spolu se spuštěnou regulací teplovzdušného modelu. Aplikace obsahuje tabulku, která mění svou velikost v závislosti na počtu připojených modulů. Každý řádek tabulky tvoří záznam hodnot z bezdrátového modulu, který je identifikován pomocí MAC adresy, která je unikátní v celé síti. Tabulka zobrazuje její zkrácenou formu. První modul s MAC adresou 0x0 je koordinátor sítě, který rovněž měří veličiny na desce, do které je vsazen (řídící nebo senzorové desky).

Jednotlivé sloupce tabulky nám vyjadřují, jaká veličina je v síti na modulech měřena. Využíval jsem opět snímače na senzorových a řídících deskách, tedy měřena byla teplota, relativní vlhkost a napětí napájecích akumulátorů. Tabulka zobrazuje také počet provedených měření a hodnoty z A/D kanálů, pokud má na ně modul připojeno nějaké zařízení, snímač apod. V našem případě se jedná o přenášená data z A/D kanálů bezdrátového modulu řídící technologický proces (teplovzdušný modul). Takže síť pro řízení technologického procesu (resp. modul řídící technologický proces) bude v konečné fázi součástí sítě *Jenie*.

Obr. 70 Monitorovací a ovládací aplikace pro senzorovou síť *Jenie*

Jednotlivé názvy položek tabulky mající názvy měřených veličin (první řádek tabulky), lze změnit v InCalc tabulkovém kalkulátoru, kde byla vytvořena šablona celé tabulky a je přiložena k *Jenie Net.* aplikaci. Tímto si velmi jednoduchým způsobem můžeme uzpůsobit aplikaci pro dané měření.

Samozřejmě je důležitá také zpětná interakce s bezdrátovými moduly, jako např. možnost nastavení periody vzorkování pro měření uvedených veličin. Po zadání této hodnoty a odesláním tlačítkem *Odeslat* se změní perioda vzorkování pro všechny bezdrátové moduly senzorové sítě *Jenie*. Součástí této sítě jsou také modul(y), které umožňují řídit technologický proces(y). Těchto modulů se ale změna netýká. Parametry pro tyto moduly jsou nastavovány a odesílány z podaplikace sítě *Jenie*, okna pro řízení teplovzdušného modelu. Každý bezdrátový modul má pak naprogramováno testování na počet příchozích Byte (obsahu payload), který je jiný pro moduly senzorové sítě a jiný pro modul řídící technologický proces. Tímto se rozhodne, zda jsou data určena pro něj nebo nikoli. Tato identifikace je popsána v kapitole 12.4.1, která náleží do řízení technologického procesu.

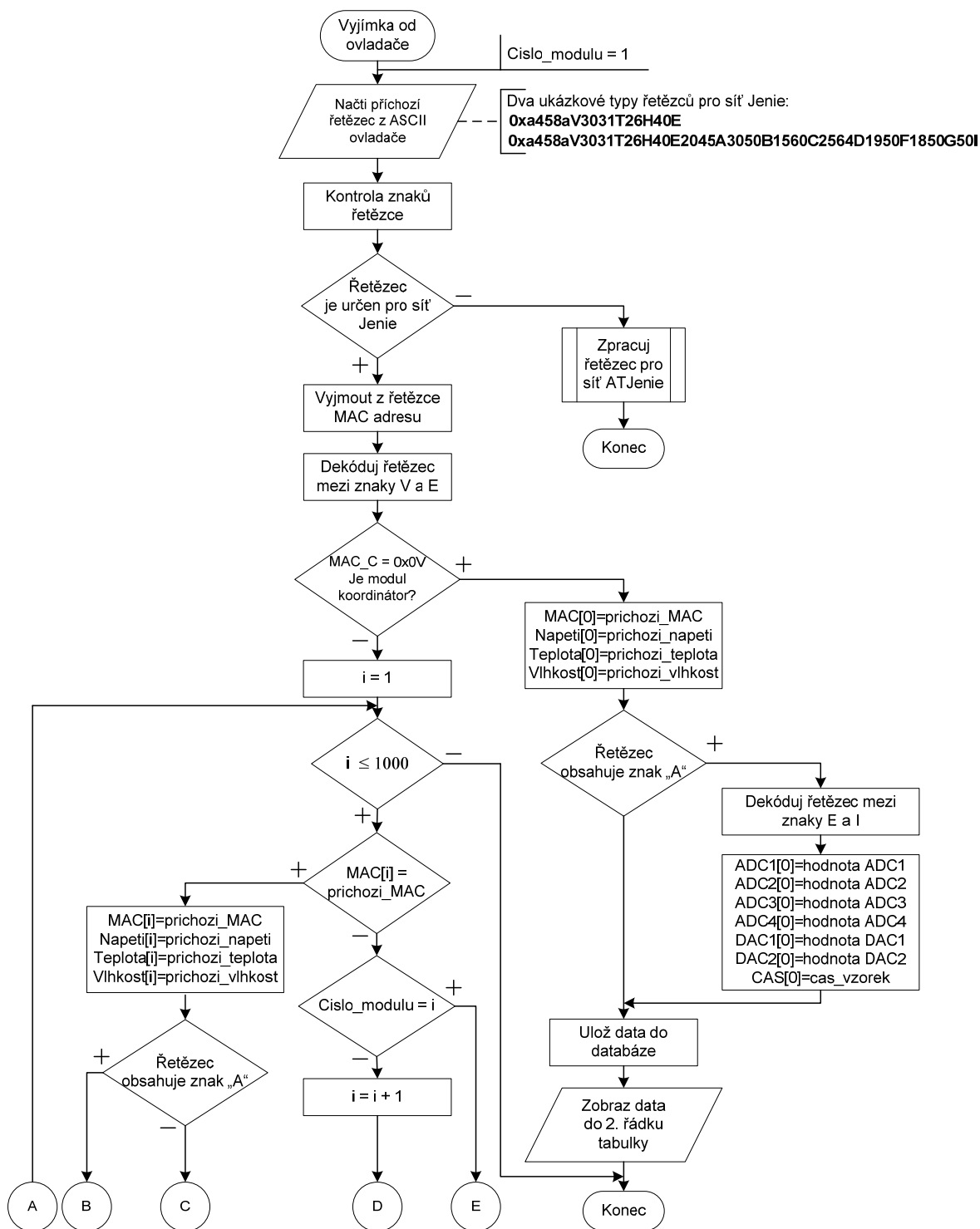
Aplikace musí být schopna zaznamenávat a vizualizovat měřená data z velkého množství bezdrátových stanic. Navíc dopředně nelze určit, kolik stanic se v síti bude nacházet. Takže se musí každý přidaný modul do sítě dynamicky přidat i do *Jenie Net.* aplikace, tabulky pro *Jenie* síť. Vývojový diagram algoritmu, podle kterého se řídí

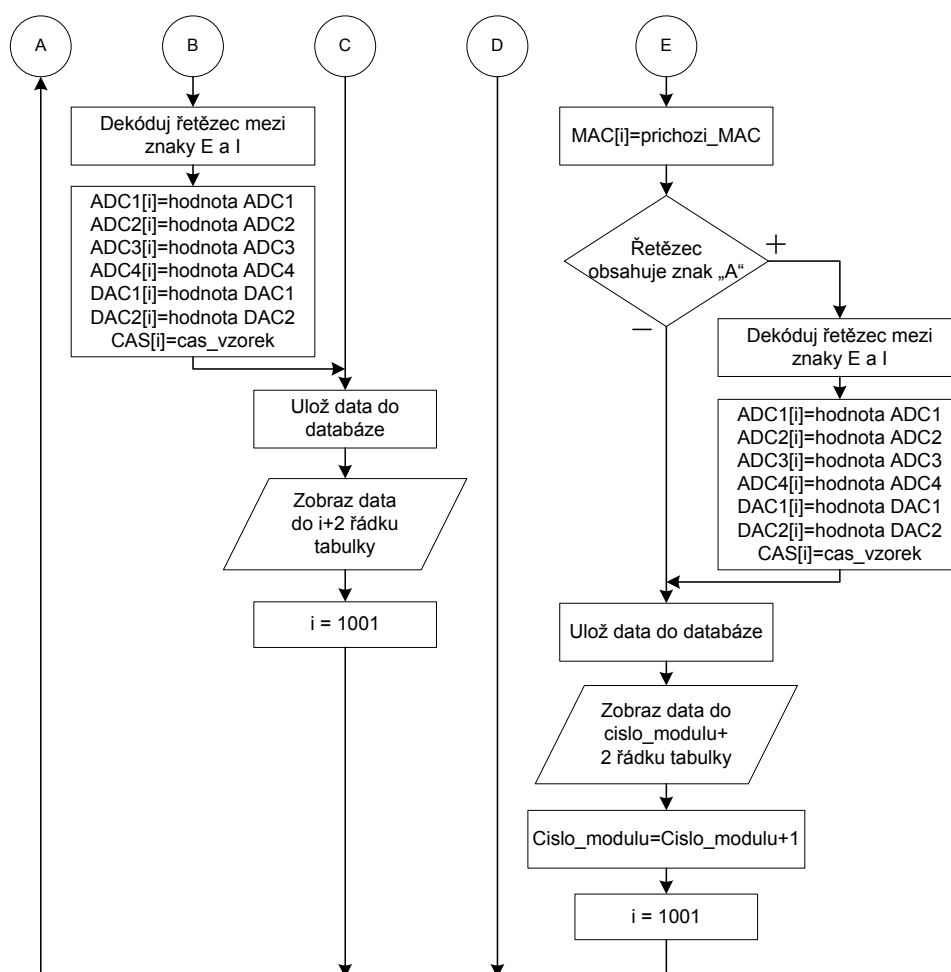
identifikace, úprava, ukládání a zobrazování přenášených dat do tabulky, včetně přidávání nových modulů můžeme vidět na obr. 71.

Příchozí řetězec od ASCII ovladače Control Webu, který může mít dva tvary, zkrácený nebo kompletní, je zobrazen na obrázku jako vstupní příchozí řetězec. První má velikost užitečných dat 6 Byte (payload) a přichází od modulů, které měří v senzorové síti, bez povolení měření z A/D kanálů. Druhý má velikost užitečných dat 22 Byte a tyto moduly mají povoleno měření z A/D kanálů, což jsou příchozí data z technologického procesu včetně hodnot z D/A kanálů a časového vzorku měření. Rozbory obou přenášených řetězců, tak jak jsou prezentovány z ASCII ovladače, jsou popsány v kapitole 13, která se zabývá spojením plošně distribuované sítě *Jenie* a sítě pro řízení technologického procesu.

V aplikaci se musí nejdříve rozhodnout, zda jsou příchozí data, resp. příchozí řetězec od ovladače splňují podmínky pro síť *Jenie* nebo síť *ATJenie*. Porovnává se délka řetězců a kontrolují se znaky v řetězci. Pokud řetězec patří do *Jenie* sítě, vyjme se z něj MAC adresa identifikující modul. Oba typy řetězců pro tuto síť mají po znak „E“ totožnou strukturu, takže se může provést dekodování řetězce od znaku „V“ do znaku „E“. Poté se testuje, zda modul, který data vyslal, je koordinátor. Pokud ano, dekodovaná data se uloží do pole nultého prvku. Následně se ověřuje, jestli se v řetězci nacházejí další data pocházející z A/D a D/A převodníků modulu. Tato kontrola se provádí na znak „A“. Pokud tato data zde jsou, dekodují se a uloží. Následně se ještě data uloží do databáze a zobrazí do 2. řádku tabulky.

Jestliže se nejedná o data přicházející od koordinátoru sítě, pak se testuje, jestli je již MAC adresa modulu odesílajícího data uložena, či nikoli. Pokud je, pak jsou data uložena do jednotlivých polí pro příslušnou veličinu na i -tou pozici dle pořadí uloženého modulu. Pokud není, nová MAC adresa se spolu s příchozími daty uloží rovněž do jednotlivých polí pro danou veličinu. Hodnoty jsou pak zobrazeny do $i + 2$, resp. $Cislo_modulu + 2$ řádku tabulky sítě *Jenie*.





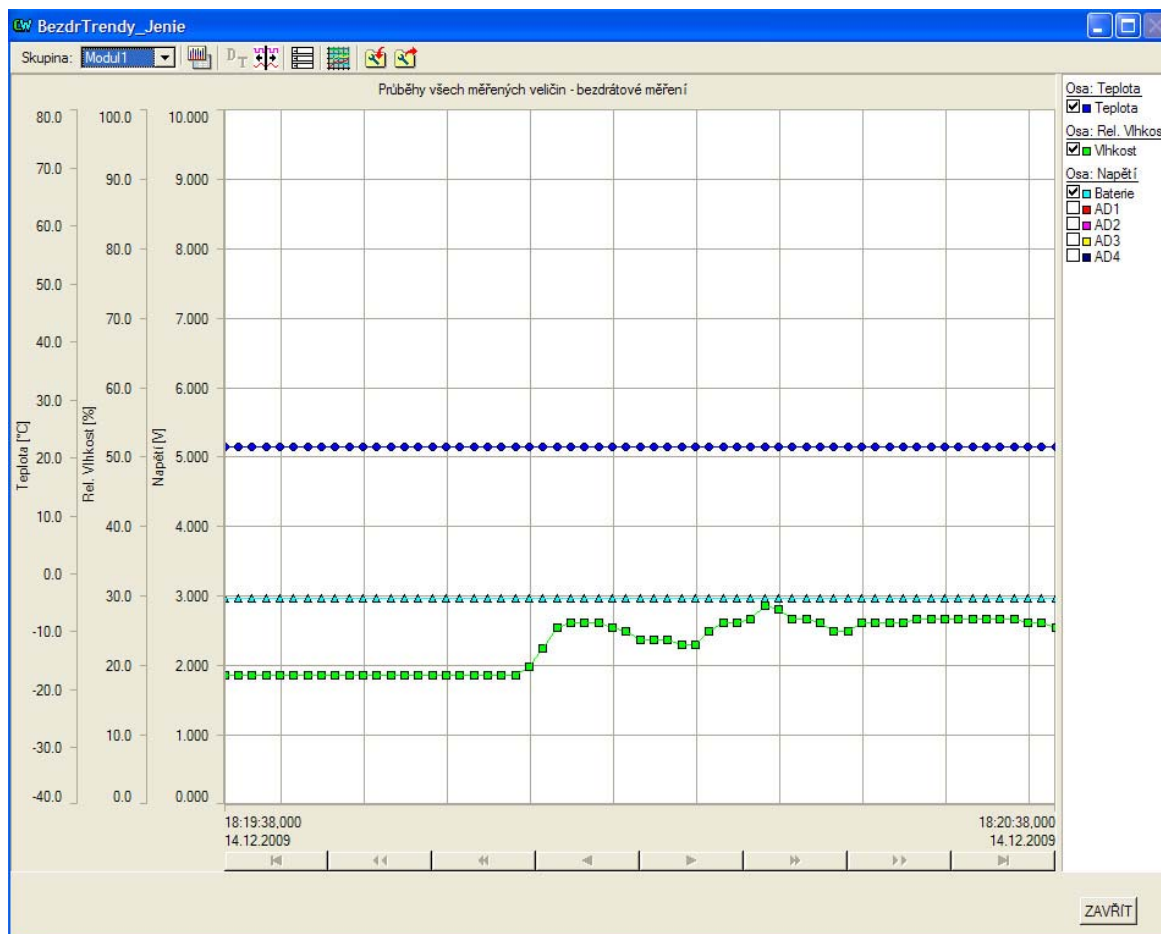
Obr. 71 Vývojový diagram pro identifikaci a ukládání nových modulů do tabulky pro síť *Jenie*

Uživatel si sám rozhoduje, zda chce do bezdrátového modulu nahrát programový kód, který bude umožňovat měřit hodnoty z A/D kanálů a rovněž přenášet data z výstupních D/A kanálů a údaje časového vzorku měření. Jedná se o program, který obsahuje modul řídicí teplovzdušný model. Pokud ovšem nechceme měřit tyto kanály, pak můžeme nahrát do modulu program bez podpory těchto kanálů, čímž ušetříme velikost přenášovaných dat, potažmo velikost přenášovaných paketů a budou se měřit pouze veličiny ze snímačů na senzorových a řídicích deskách.

Vytvořená aplikace také zobrazuje stavy komunikace ovladače sériové linky, název komunikačního portu, na který je koordinátor sítě připojen a název chyby, generovaný ovladačem.

Tlačítko *Nulování počtu měření* slouží k vynulování počítadla počítající příchozí data, resp. počet provedených měření. Všechny naměřené veličiny jsou uloženy do databáze, souboru s příponou *.MDB, stejně jako tomu bylo u sítě *ATJenie*. Tento soubor je poněkud objemnější co týká obsahu dat, protože ukládá všechna data pro všechny moduly v síti. Databázový soubor je zakládán permanentně s označením ModulJenieX_@@@, kde znaky představují číselné označení a tím i pořadí vytvořených

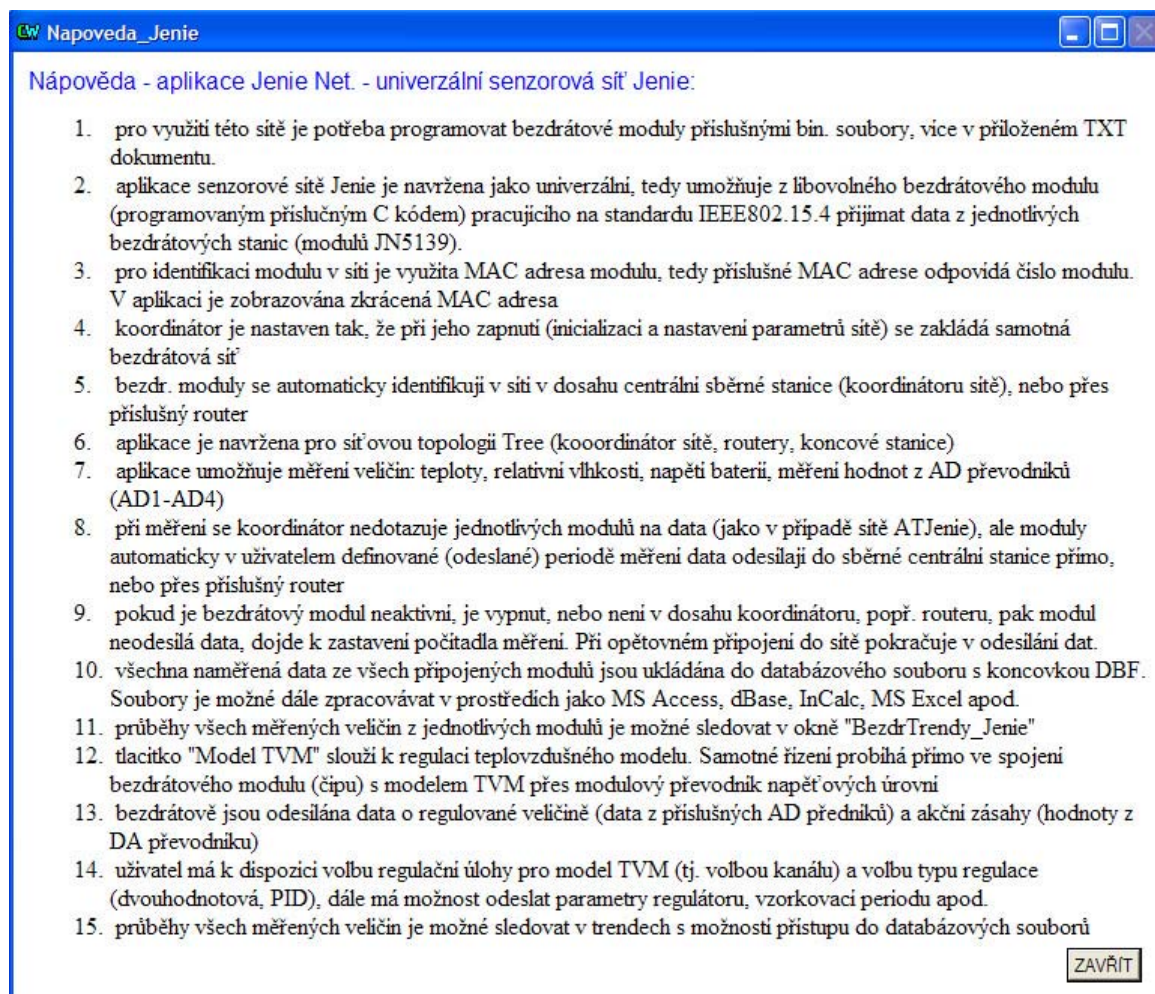
souborů. Pro zobrazení průběhů měřených veličin je k dispozici okno s názvem *BezdrTrendy_Jenie*, viz. obr. 72, na které se dostaneme přes tlačítko *Trendy*.



Obr. 72 Zobrazení trendů pro síť *Jenie*

Strukturu zobrazení trendů jednotlivých měřených veličin lze měnit, k tomu nám slouží nástroje v liště trendů. Takže je možné si nechat zobrazovat data jako např. výpis měřených veličin s datem a časovou značkou, jako graf apod. Stejně tak můžeme upravovat i osy grafu, jako rozsah, název apod. Nejdůležitější vlastností trendu je možnost vybrat si veličinu nebo více veličin a modul, ze kterého chceme data zobrazovat.

Jenie Net. obsahuje také nápovědy pro obě vytvořené sítě. Jak pro síť *ATJenie*, tak pro síť *Jenie*, viz obr. 73, zobrazující nápovědu pro síť *Jenie*. Tlačítko *Model TVM* zpřístupňuje možnost vizualizace teplovzdušného modelu a ovládání bezdrátového modulu, který jej řídí. Tlačítko *MENU* slouží pro návrat do hlavního menu a tlačítkem *KONEC* se ukončí celá aplikace.



Obr. 73 Zobrazení nápovědy pro síť Jenie

11.2.1 Úspora elektrické energie bezdrátových modulů

Obecně se bezdrátové technologie potýkají s problémem velkého odběru elektrické energie stanic, které vysílají nebo přijímají data. Zařízení standardu 802.15.4 s danou vrstvou stack mají tu výhodu, že mají poměrně nízkou náročnost na odběr elektrické energie a navíc je lze uvést do spánkového režimu („sleep“ režimu), který pozitivním způsobem ovlivňuje odběr bezdrátové stanice. Proto není problém takovéto bezdrátové moduly napájet akumulátorem na rozdíl od modulů, postavených na jiné bezdrátové technologii. Koordinátor a směrovače nemohou být do tohoto stavu uvedeny, takže jediným modulem v síti je koncová stanice. Pro tu je možné programovat do aplikace algoritmy, které jí umožní po určité době spánkový režim s určitým stavem, jako s držením paměti, bez držení paměti apod.

Koncové stanice náležící do sítě *ATJenie* nemají programovány algoritmy, které by automaticky modul uvedly do stavu se sníženou spotřebou. Tady musí být odeslán AT příkaz, který stanici do tohoto režimu uvede. Takže modul má naprogramovány algoritmy pro snížení spotřeby režimem „sleep“, ale aktivují se, až po požadavku z aplikace *Jenie Net.*, záložky *ATJenie*. K dispozici jsou dva AT příkazy a to SSP a SLP. Popis těchto příkazů je uveden v příloze IV.

Sít' *Jenie* má naprogramovány velmi podobné algoritmy jako pro sít' *ATJenie* s tím rozdílem, že spánkový režim se aktivuje vždy po vykonání dané akce, tedy v našem případě měření veličin. Funkce, která uvádí bezdrátový modul do spánkového režimu po určitou dobu, vypadá následovně:

```
PUBLIC teJenieStatusCode eNetwork_Sleep (
    uint32                u32SleepPeriodMs,   /**Doba spanku (ms)*/
    teJenieSleepMode      eSleepMode)         /**Spankovy mod */
{
    teJenieStatusCode eStatus = E_JENIE_ERR_INVLD_PARAM;

    /* Kontrola, zda se jedna o koncovou stanici */
    if (eNetwork_DeviceType() == E_JENIE_END_DEVICE)
    {
        /* Zakaz preruseni od casovace 1 - provadi mereni velicin */
        vJPI_WakeTimerEnable(E_JPI_WAKE_TIMER_1, FALSE);
        /* Nastaveni doby spanku v ms */
        (void) eJenie_SetSleepPeriod(u32SleepPeriodMs);
        /* Uvedeni do rezimu sleep */
        eStatus = eJenie_Sleep(eSleepMode);
        /* sitovy debugging - odladeni chyb */
        #if NETWORK_DEBUG
            if (bUartUp)
            {
                vPrintf("Sleep(%d) = %s\n",
                        eSleepMode,
                        aszStatusCode[eStatus]);
            }
        #endif
    }

    return eStatus;
}
```

Asi není potřeba popisovat všechny funkce, které jsou ve funkci pro spánkový režim použity. Zdůrazníme pouze nejvýznamnější a to funkci *eJenie_Sleep(eSleepMode)*, která uvádí modul do spánkového režimu. Tady před provedením samotné akce vzniká malé prodlení, protože modul musí dokončit všechny prováděné úlohy. Předávaný parametr této funkce definuje, zda bude modul ve spánkovém režimu s aktivním časováním a zda bude modul udržovat obsah paměti RAM či nikoli. V našem případě tento parametr říká, že časování je aktivní a paměť bude v modulu udržována (parametr

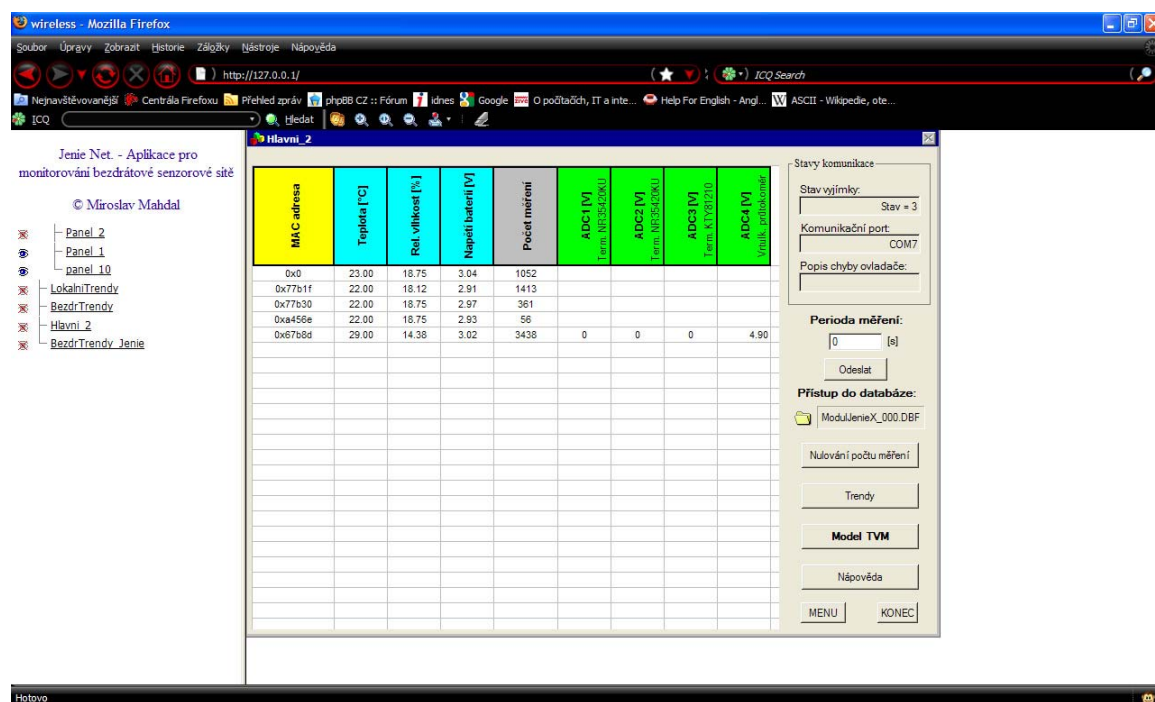
E_JENIE_SLEEP_OSCON_RAMON). Tato metoda používá časovač pro návrat modulu ze spánkového režimu, který vyžaduje 32 kHz oscilátor běžící během spánku modulu. Druhá důležitá funkce je *eJenie_SetSleep_Period(u32SleepPeriodMs)*. Tato funkce má předávaný parametr (hodnota v milisekundách), který říká, po jakou dobu bude modul ve spánkovém režimu. Proudový odběr koncové stanice v uvedeném režimu, tak jak je definován v bezdrátové síti *Jenie*, popř. *ATJenie* je zhruba $3,6 \mu\text{A}$, kde pro napájení paměti RAM se využívá zhruba $2,4 \mu\text{A}$ a pro zbylé prostředky jako 32 kHz oscilátor s časováním zhruba $1,2 \mu\text{A}$, viz [Jennic Power Estimation 2010].

Další možnosti, které mohou šetřit spotřebu elektrické energie bezdrátových modulů, jsou např. snížení výkonu vysílače, vypnutí bezdrátového modulu apod. Tyto metody zatím nebyly implementovány.

11.3 Distribuce dat do sítě Intranet/Internet

Systém Control Web má k dispozici nástroj pro distribuci dat do prostředí sítě Intranet/Internet. Jedná se o nástroj s názvem *httpd*. Tento přístroj je plnohodnotným webovým serverem, který umožňuje přistupovat uživatelům na vytvořenou aplikaci přes standardní komunikační protokol TCP/IP. Uživatel může vzdáleně vizualizovat a ovládat vytvořenou aplikaci běžící v systému Control Web.

Pro přístup na vytvořenou aplikaci *Jenie Net.* nám tedy stačí pouze webový prohlížeč, viz obr. 74. Na klientském PC, ze kterého na aplikaci vzdáleně přistupujeme, nemusíme mít instalován Control Web, ani žádnou jeho součást, jako např. Control Web Runtime.



Obr. 74 Přístup na aplikaci *Jenie Net.* přes webové rozhraní

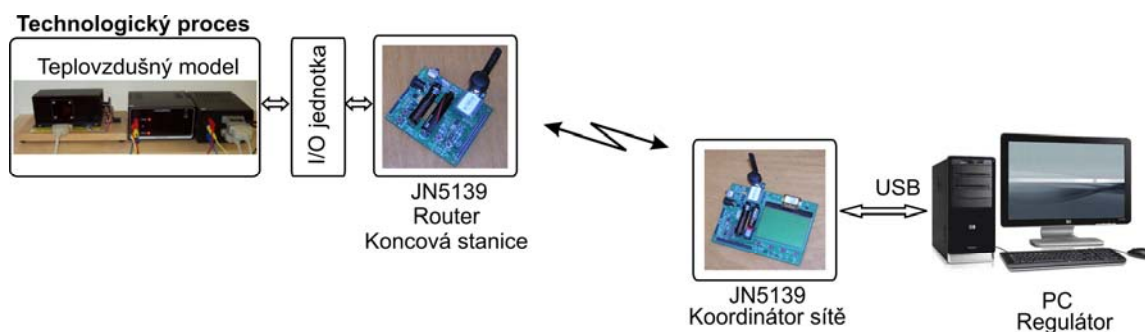
Abychom mohli přistoupit vzdáleně přes webový prohlížeč na aplikaci *Jenie Net.*, je potřeba znát IP adresu serveru, tedy PC, na kterém je aplikace spuštěna. Tímto způsobem je přes webové rozhraní k dispozici jak síť *ATJenie*, tak síť *Jenie*.

Velkou výhodou tohoto přístupu je, že aplikace *Jenie Net.* se tímto způsobem stává nezávislá na systémové platformě (Windows, Linux, Unix apod.).

12 Nasazení bezdrátové sítě pro řízení procesu

V dnešní době v průmyslové praxi se stále častěji projevuje nutnost řídit různé typy soustav, ukládat, zpracovávat a dálkově přenášet množství dat z technologického procesu. Jednou z variant řízení a přenosu dat z procesu se jeví i možnost začlenění bezdrátové technologie, která je založena na standardu IEEE 802.15.4. Řízení technologického procesu pomocí bezdrátové sítě je řešením, které představuje jisté výhody i nevýhody. Mezi výhody lze určitě zařadit především volnost od kabelového připojení, což naznačuje i použití v oblastech, kde nelze kabelové připojení vůbec použít jako např. u rotačních součástí strojů, při posuvných úkonech apod. Zde se metalické vedení jeví spíše jako obtíž s hrozbou přerušení spojení vlivem pohybových úkonů zařízení. Bezdrátové zařízení pracující v sítích standardu IEEE 802.15.4 jsou primárně určeny pro vzdálené ovládání, monitorování stavu zařízení, snímání veličin z připojených snímačů s následným bezdrátovým přenosem dat. Navíc již ze samotné definice tohoto standardu vyplývá, že hlavní výhodou je schopnost vytvářet síťovou topologii, kde bezdrátové stanice za pomoci koordinátoru sítě vytváří síť, téměř s libovolnou hloubkou větvení.

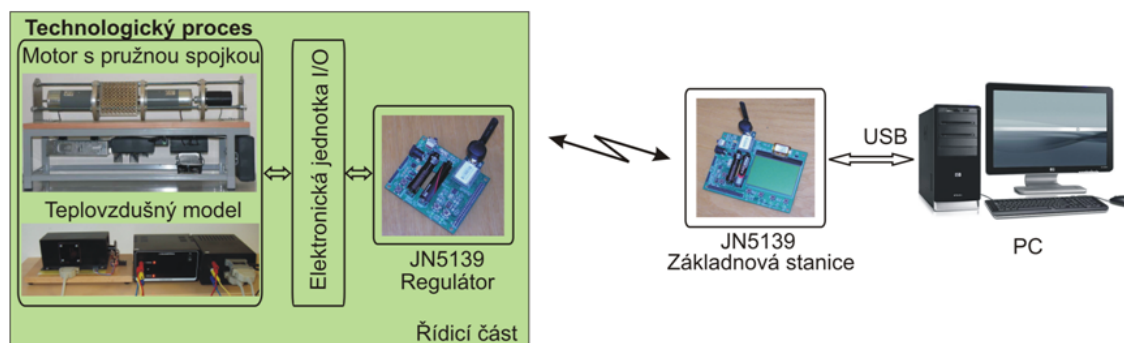
Další výhodou je nízká energetická spotřeba bezdrátových modulů, což odpovídá nejen použitým elektronickým součástkám ze kterých je modul složen, ale také samotný standard umožňuje využívat pro moduly tzv. „sleep“ režimy, kde životnost těchto modulů na akumulátorové napájení je několikanásobně zvýšena. Navíc přenosová rychlost je definována zhruba na 250 kbit/s. Z těchto uvedených skutečností je zřejmé, že pro řízení technologických procesů není tento standard příliš vhodný. Nicméně pokud se zaměříme na rychlost bezdrátového přenosu a samotný bezdrátový modul, lze řídit technologický proces i pomocí standardu IEEE 802.15.4 velmi efektivně. K dispozici máme 32 bitový RISC mikroprocesor s bezdrátovým rozhraním a přenosovou rychlostí 250 kbit/s. Při maximální délce přenášených rámců o velikosti 127 Byte je možné doručit na přímé přenosové cestě od vysílače k přijímači teoreticky 246 datových rámců za sekundu. Realita bývá ovšem jiná v závislosti na skutečné přenosové rychlosti odvíjející se také od prostředí, ve kterém přenos probíhá a skutečné délce přenášených rámců. Výsledná vzorkovací frekvence, se kterou jsme schopni přenášet data, je tedy závislá především na měření, a bude různá pro specifická prostředí. Pro řízení technologického procesu byly uvažovány dvě koncepce možného řízení. První koncepce uvažuje bezdrátové řízení, kde samotný regulátor je programován na PC, které je připojeno ke koordinátoru sítě. Ten odesílá data do koncové stanice nebo směrovače napojeného na technologický proces přes I/O jednotku, viz obr. 75.



Obr. 75 Bezdrátové řízení s bezdrátovou zpětnou vazbou

Bezdrátový modul připojený k technologickému procesu plní funkci pouze ovládací, tedy nastavuje velikost napětí na D/A převodnících skrze přizpůsobovací obvody přímo na akčních členech technologického procesu. Přičemž velikost akčního zásahu je počítána v programovém schématu regulátoru na PC. Tento modul také snímá hodnotu regulované veličiny pomocí snímačů technologického procesu a realizuje bezdrátovou zpětnou vazbu posíláním dat do koordinátoru sítě, potažmo do PC pro výpočet regulační odchylky. Tato varianta představuje problémy se synchronizací přenášených paketů mezi vysílací a přijímací stranou se zajištěním správné vzorkovací frekvence. Největší problém představuje výpadek signálu bezdrátového modulu, kdy technologický proces je v tu chvíli neřízený, protože nedostáváme informaci ze zpětné vazby. Na bezdrátovém modulu připojeného k řízenému procesu by byla buď nastavena původní hodnota velikosti akčního zásahu, která by přetrvávala až do chvíle obnovení signálu nebo by muselo dojít k beznárazovému přepnutí na regulaci procesu regulátorem implementovaným do modulu připojeného přímo k technologickému procesu. Poté by byla nutná opětovná synchronizace. Tato koncepce bezdrátového řízení sice byla částečně testována, ale i tak nelze problémy s tímto spojením přesně definovat. Lze pouze předpokládat, že v některých případech takový výpadek nemusí způsobit velké problémy, např. v aplikacích, kde časové konstanty požadované na řízení procesu jsou v řádech stovek milisekund nebo lépe sekund. Typickým příkladem může být regulace teploty, výšky hladiny apod.

Jako druhá koncepce pro nasazení bezdrátových technologií do řízeného procesu byla vybrána možnost přímého řízení, tedy bezdrátový modul obsahující algoritmus regulátoru přímo řídí technologický proces, viz obr. 76.



Obr. 76 Řízení technologického procesu s bezdrátovým přenosem dat

Tento způsob řízení je v praxi velmi často používáný, pouze průmyslový regulátor je zde nahrazen mikroprocesorem (bezdrátovým modulem) realizující číslíkový regulátor. Ten přímo vypočítává velikost akčního zásahu na D/A převodníky (pro akční člen) z hodnot regulační odchylky. Ta je získána z rozdílu žádané hodnoty a regulované veličiny, v příslušném kroku řešení, pro vypočtené váhy regulátoru. Bezdrátově jsou v každém kroku výpočtu odesílány informace o nastavené hodnotě akčního zásahu, velikosti regulované veličiny a časové značce. Tato data jsou zpracována na připojeném PC, na kterém běží vytvořená aplikace *Jenie Net.*, podokno pro řízení TVM modelu *Model_TVM_Jenie*. Odtud můžeme sledovat přímo regulační proces a vzdáleně bezdrátově nastavovat hodnotu žádané veličiny, vzorkovací periodu, či stavitelné parametry regulátoru. Tento způsob řízení se jeví jako výhodnější varianta, protože i při výpadku signálu mezi bezdrátovými moduly bude regulace technologického procesu pokračovat plynule dál, nebudou však doručena všechna data z regulačního procesu do operátorského stanoviště. V tomto případě je však možné detekovat výpadek signálu a data ukládat lokálně na bezdrátovém modulu pro pozdější doručení. Tato koncepce bude řešena v následujících kapitolách, kde jako technologický proces byl vybrán laboratorní model teplovzdušného agregátu. Ten nabízí možnost testování navržené koncepce na několika regulačních úlohách s požadavkem na odlišnou frekvenci vzorkování.

12.1 Popis teplovzdušného modelu

Jako náhrada technologického procesu byl jako jedním z možných systémů vybrán laboratorní model teplovzdušné soustavy. Tento model je velmi hojně využíván k výuce na katedře ATR352, a proto provedené úpravy pro alternativní možnost řízení budou mít přínos pro studenty katedry. Model disponuje množstvím snímačů a je možné vytvořit několik regulačních úloh pro testování bezdrátových modulů. Podrobný popis modelu včetně obrázků, blokové schéma a způsob řízení pomocí jednotky CTRL a PC, viz [Smutný 2001] a [Škuta, Smutný 2005]. Na obr. 77 můžeme vidět laboratorní model s původním řízením pomocí jednotky CTRL v3.



Obr. 77 Laboratorní model teplovzdušné soustavy

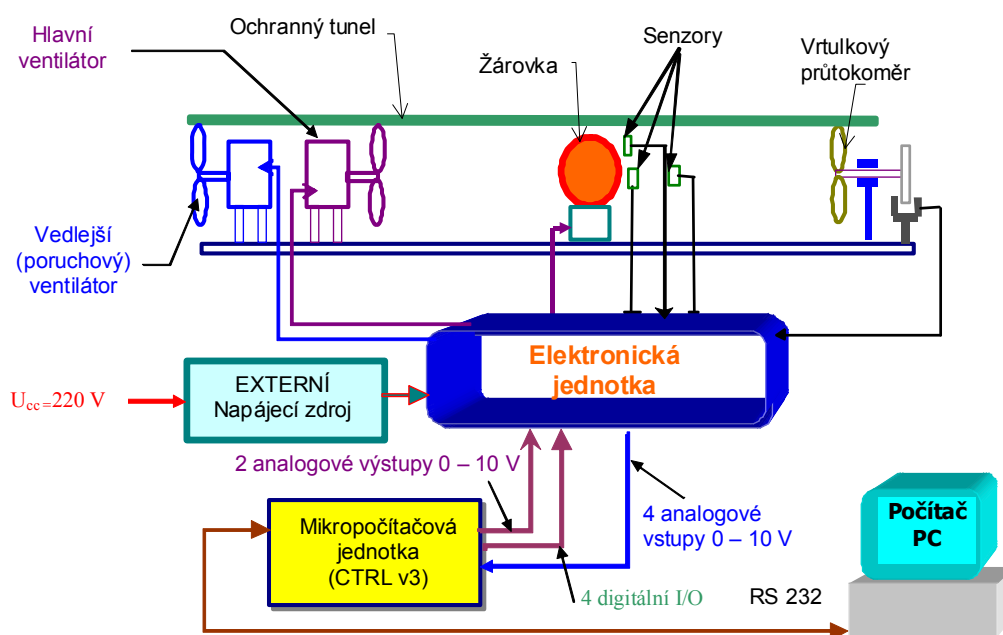
Teplovzdušný model (agregát) je tvořen zdrojem tepla – žárovkou napájenou z ovládaného zdroje napájecího napětí širkově modulovaným signálem (vytváří tak definovaný tepelný a světelný zdroj). Žárovka je umístěna v krytém tunelu, kterým je nasáván či vytlačován vzduch pomocí hlavního ventilátoru (ten je rovněž napájen pomocí říditelného zdroje napětí). Popisovaný model umožňuje realizovat jak jednorozměrové, tak mnohorozměrové regulační úlohy. Je zde možnost volby výstupní (měřené) veličiny, kterou může být teplota měřená snímači umístěnými v různých vzdálenostech od zdroje tepla (jedná se o soustavu „žárovka – termistor“), pro zjednodušení budeme dále používat označení soustava termistor. Průtok vzduchu v tunelu je měřený vrtulkovým průtokoměrem (soustava „hlavní ventilátor – vrtulkový průtokoměr“), pro zjednodušení budeme používat označení soustava vrtulkový průtokoměr.

Model teplovzdušného obvodu je možné ovládat dvěma akčními členy, tj. zdrojem tepla – žárovkou a hlavním ventilátorem. Výkon na žárovce je ovládán změnou analogového napětí na žárovce. Ovládání otáček hlavního ventilátoru je realizováno velikostí ovládacího napětí.

Uvnitř tunelu teplovzdušného modelu jsou tyto typy snímačů:

- Termistor T1 (NR 354 20 KU) umístěný na baňce žárovky.
- Termistor T2 (NR 354 20 KU) umístěný 5 mm od baňky žárovky.
- Termistor T3 (KTY81210) umístěný na baňce žárovky.
- Objemový vrtulkový průtokoměr (VP) – jedná se o měřicí vrtulku s připojeným snímačem otáček.

Blokové schéma modelu verze 2005 je možné vidět na obr. 78.



Obr. 78 Blokové schéma teplovzdušného modelu s jednotkou CTRL v3, [Škuta, Smutný 2005]

Blokové schéma zobrazuje připojený vedlejší ventilátor, který je ovládán pomocí 4 diskretních I/O výstupů, což omezuje možnosti zavádění poruchy. Elektronická jednotka slouží k převodu signálů z jednotlivých snímačů (termistorů a vrtulkového průtokoměru) na napětí v rozsahu 0 – 10 V a rovněž k možnosti ovládání akčních členů (žárovky a hlavního ventilátoru). Ovládání tepelného a světelného výkonu žárovky je prováděno obvodem elektronické jednotky, umožňující měnit výkon na žárovce pomocí pulsně šířkové modulace (PWM). Hlavní ventilátor je ovládán velikostí přivedeného napětí v rozsahu 0 – 10 V. Analogové výstupy ze snímačů jsou 4 a to dva termistory T1 a T2 s označením NR 354 20 KU a jeden křemíkový polovodičový senzor typu KTY 81 210. Objemový průtok vzduchu je měřen vrtulkovým průtokoměrem s impulsním výstupním signálem, který je převeden na analogové napětí 0 – 10 V. Tento člen využívá vyhodnocovací obvod elektronické jednotky, jehož základ tvoří klopný obvod 74 123. Elektronická jednotka využívá unifikační obvody pro normalizaci signálů z teplotních snímačů podle konkrétních typů použitých senzorů.

12.1.1 Sensory teplovzdušného modelu

Jak již bylo popsáno výše, teplovzdušný model má uvnitř tunelu v blízkosti žárovky tři snímače, resp. dva typy snímačů teploty s označením NR 354 20 KU a KTY 81 210.

Snímač KTY 81 210 má kladný teplotní součinitel, tedy jedná se o termistor typu PTC (Positive Temperature Coefficient), též nazývaný jako pozistor. Se zvyšující se teplotou roste velikost elektrického odporu. Tento typ termistorů se běžně používá k omezení proudu obvodem, kde větší průchod proudu vyvolává ohřátí součástky, která má díky tomu vyšší hodnotu odporu. Je vhodný pro použití v měřicí i řídicí technice. Senzor má pouzdro typu SOD70 a je zobrazen na obr. 79.



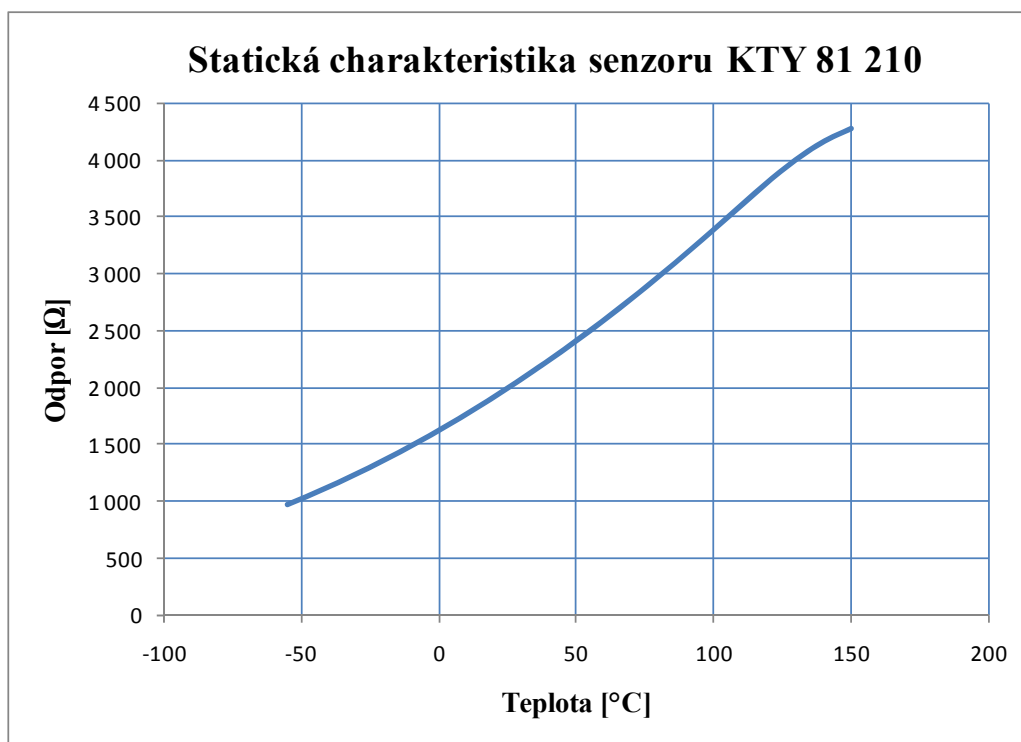
Obr. 79 Senzor KTY 81 210 v pouzdře SOD70

Typické vlastnosti tohoto senzoru můžeme vidět v tab. 11.

Tab. 11 Charakteristické vlastnosti senzoru KTY 81 210

Pracovní teplota	-55 °C až 150 °C
Rozsah velikosti odporu	980 Ω až 4280 Ω
Rozsah odporu při teplotě 25 °C	1980 Ω až 2020 Ω tolerance ± 1 %
Přesnost při teplotě 25 °C	1,3 °C
Proud senzorem při teplotě 25 °C	1 mA

Na obr. 80 můžeme vidět teplotně odporovou charakteristiku senzoru.



Obr. 80 Senzor KTY 81 210 - závislost odporu na teplotě při zprůměrovaných hodnotách odporu

Snímač teploty s označením NR 354 20 KU má oproti snímači KTY 81 210 záporný teplotní součinitel, což znamená, že se zvyšující se teplotou se zvyšuje koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor klesá. Jedná se tedy o NTC termistor (Negative Temperature Coefficient). Tento druh termistorů bývá označován jako negastor. Snímač se vyznačuje přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozmezí měřených teplot od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, dlouhodobou stabilitou a malými rozměry. Je vhodný pro použití jako teplotní čidlo elektronických termostátů, teploměrů, vhodný pro měření, regulaci apod. Senzor NR 354 20 KU můžeme vidět na obr. 81, jeho typické vlastnosti pak v tab. 12.

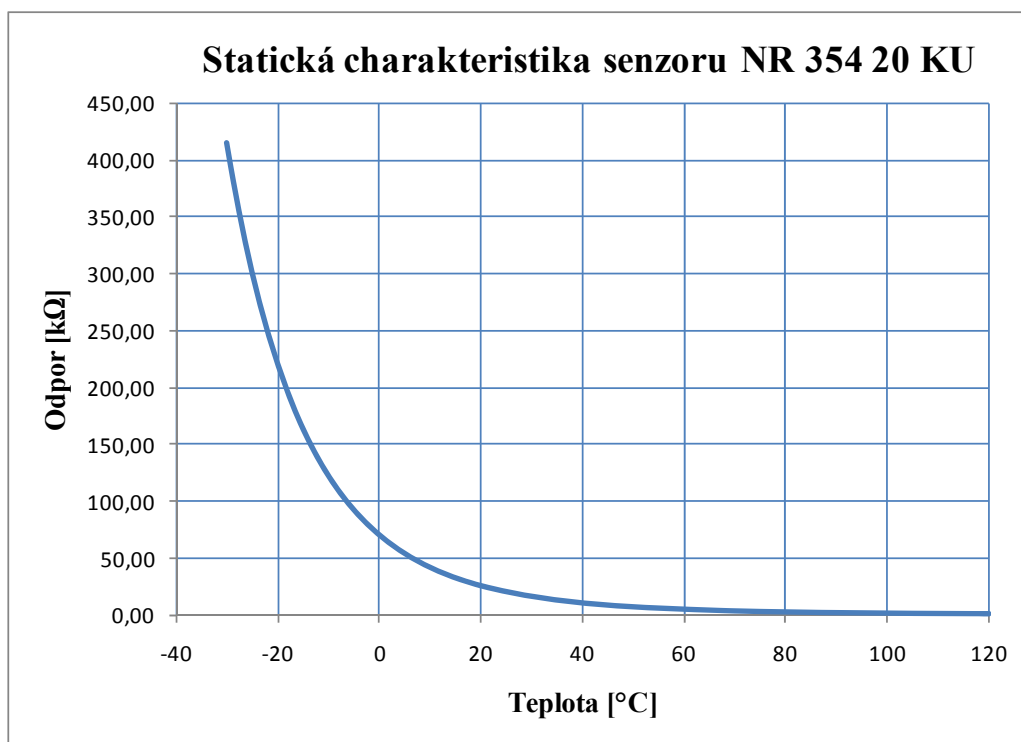


Obr. 81 Senzor NR 354 20 KU

Tab. 12 Charakteristické vlastnosti senzoru NR 354 20 KU

Pracovní teplota	-30 °C až 120 °C
Rozsah velikosti odporu	609 Ω až 415 kΩ
Jmenovitý odpor při teplotě 25 °C	20 kΩ tolerance $\pm 1\%$
Přesnost při teplotě 25 °C	1 °C
Proud senzorem při teplotě 25 °C	1 mA

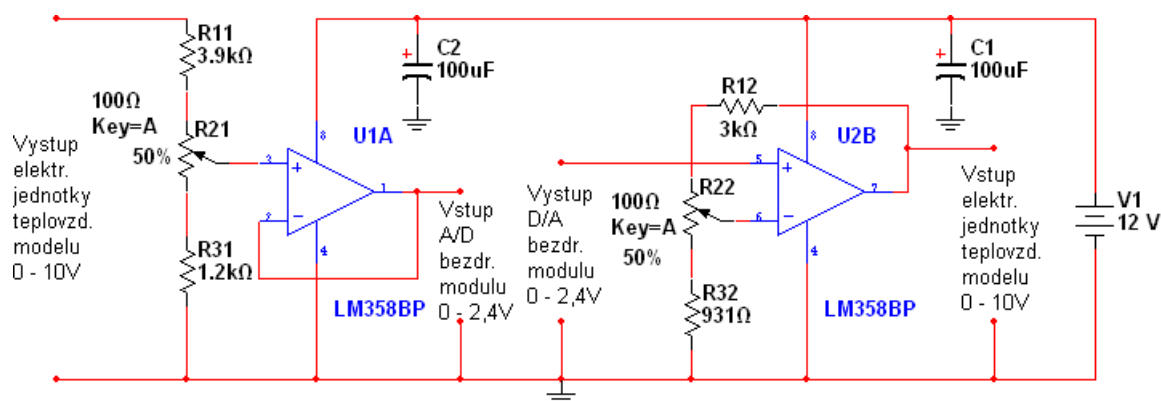
Teplotně odporová charakteristika senzoru je uvedena na obr. 82.



Obr. 82 Senzor NR 354 20 KU - závislost odporu na teplotě při zprůměrovaných hodnotách odporu

12.2 *Připojení bezdrátového modulu k teplovzdušnému modelu*

Stávající zapojení teplovzdušného modelu, které je popsáno v kapitole 12.1 muselo být pro připojení bezdrátového modulu JN5139 upraveno. Jedná se především o odstranění jednotky CTRL v3, která byla použita ke komunikaci s PC pomocí sériové linky. Dále bylo nutné vytvořit elektronický obvod pro úpravu vstupního a výstupního napětí bezdrátového modulu a elektronické jednotky modelu. Bezdrátový modul je naprogramován tak, aby využíval dvojnásobné vstupní napětí pro A/D převodník, tomu odpovídá rozsah vstupního napětí o velikosti 0 V až 2,4 V. Stejná velikost napětí platí i pro výstup z D/A převodníku. Elektronická jednotka teplovzdušného modelu má ovšem napěťový vstup a výstup o velikosti 0 V až 10 V. Schéma elektronického obvodu pro přizpůsobení napětí elektronické jednotky a bezdrátového modulu lze vidět na obr. 83. Obvod je složen z duálních operačních zesilovačů s označením LM358. Důvodem použití operačních zesilovačů je potřebný proudový výstup pro elektronickou jednotku, který nemůže bezdrátový modul samostatně dodat. Jeden operační zesilovač tohoto obvodu byl použit pro převod napětí z elektronické jednotky na A/D převodník bezdrátového modulu, zatímco druhý operační zesilovač zesiluje napětí z D/A převodníku modulu.



Obr. 83 Schéma zapojení elektronického obvodu pro přizpůsobení napětíových vstupů a výstupů

První operační zesilovač s označením U1A je v zapojení jako napětíový sledovač a jeho zesílení $A_u = 1$. Tedy velikost výstupního napětí bude odpovídat velikosti vstupního napětí. Jde o zesilovač se 100 % zápornou zpětnou vazbou a hodnota vstupního napětí do operačního zesilovače je dána odporovým děličem skládající se z odporů R11, R21 a R31. Výpočtem vhodných velikostí elektrických odporů, viz obr. 83 jsme schopni zajistit požadované napětí na výstupu operačního zesilovače, tedy na vstupu A/D převodníku bezdrátového modulu. Tato hodnota napětí se může pohybovat od 0 V do 2,4 V. Potenciometrem R21 o velikosti 100 Ω lze doregulovat vstup na A/D převodník bezdrátového modulu tak, aby odpovídalo určité velikosti napětí přicházejícího z výstupu elektronické jednotky teplovzdušného modelu. Tzn. maximálnímu napětí 10 V z elektronické jednotky musí odpovídat napětí 2,4 V pro bezdrátový modul. Druhý operační zesilovač U2B obvodu LM358 je v zapojení jako neinvertující zesilovač a jeho výsledné napětíové zesílení, pokud nebudeme uvažovat hodnotu potenciometru pro jemné doladění napětí, je dáno vztahem:

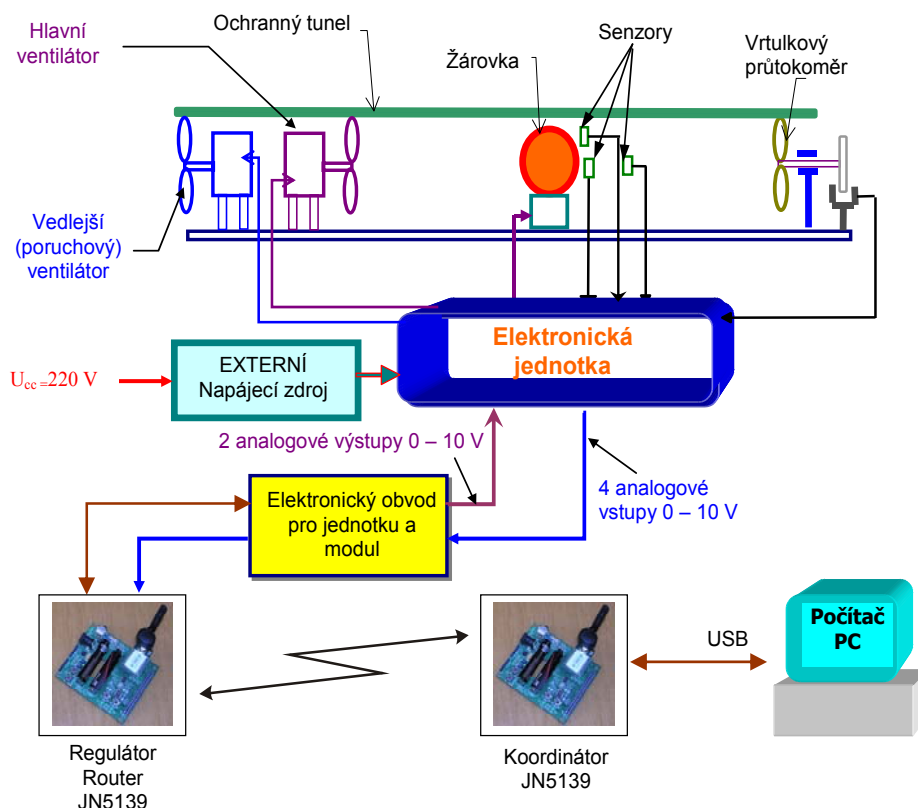
$$A_u = 1 + \frac{R12}{R32}, \quad (13)$$

což při vypočtených hodnotách odporů 3 kΩ pro R12 a 931 Ω pro R32 odpovídá velikost napětíového zesílení zhruba 4,22. Takže výstupní napětí operačního zesilovače a zároveň vstupu do elektronické jednotky teplovzdušného modelu lze vyjádřit jako:

$$U_{Vyst} = \left(1 + \frac{R12}{R32}\right) \cdot U_{Vstup}. \quad (14)$$

Zhotovená deska plošných spojů pro elektronický obvod je uvedena v příloze II.

Blokové schéma upraveného teplovzdušného modelu s náhradou jednotky CTRL v3 za výše vytvořený elektronický obvod, včetně připojení k regulátoru v podobě bezdrátové stanice (ve funkci směrovače) s připojením k PC přes koordinátor sítě, je uvedeno na obr. 84. Toto zapojení odpovídá koncepci, která byla dříve popsána v kapitole 12 na obr. 76.



Obr. 84 Blokové schéma upraveného teplovzdušného modelu

12.3 Struktura a aplikace číslicových regulátorů

Chování analogových regulátorů lze popsat pomocí diferenciálních rovnic a lze je realizovat pomocí prvků analogové elektroniky. Ty je možné aproximovat pomocí diskretních regulátorů s popisem diferenčními rovnicemi a lze je realizovat pomocí číslicových počítačů, které jsou obvykle jednočipové a tvoří základ číslicových regulátorů. V případě analogových regulátorů se jednalo především o elektronické obvody složené z operačních zesilovačů. V našem případě bude číslicový regulátor představovat bezdrátový modul JN5139, kde jeho strukturu lze vidět v kapitole 5.2 na obr. 29. Použitý mikroprocesor integruje na jednom čipu 32 – bitový mikroprocesor RISC, paměti ROM, RAM, FLASH paměť, která slouží k ukládání programu a dat, jejíž obsah musí být zachován i po odpojení napájecího napětí.

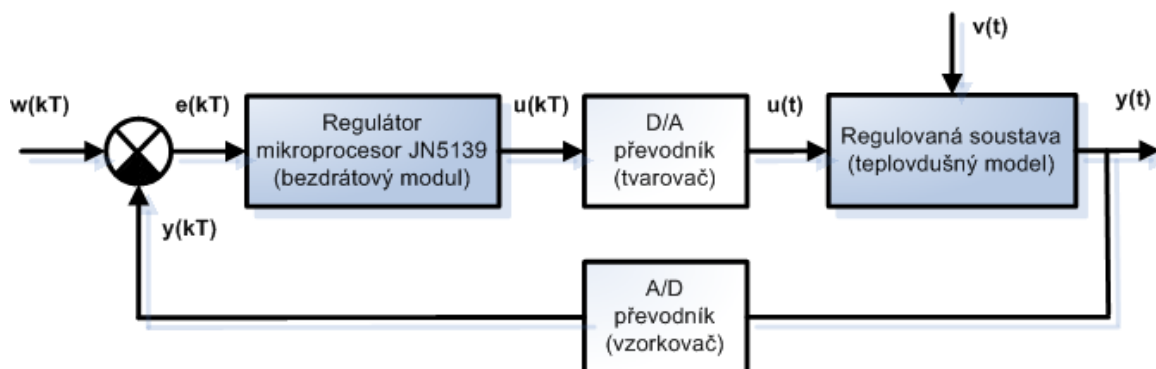
Regulátor, i když je číslicový, bude řídit procesy, které jsou spojitého charakteru a proto je nutné využití A/D a D/A převodníků, které jsou rovněž součástí vstupně/výstupních obvodů mikroprocesoru. Důležitou součástí mikroprocesoru, potažmo regulátoru jsou časovací obvody, které jsou obvykle realizované pomocí přesného krystalem řízeného oscilátoru s proměnným děličem kmitočtu. Tímto lze vytvořit přesnou a stabilní časovou základnu, která zabezpečí v algoritmu číslicového řízení konstantní periodu vzorkování. Tuto periodu lze ovšem měnit dle požadavků regulačního algoritmu, ovšem ne nahodile. Součástí regulátoru velmi často bývají další pomocné obvody, které zabraňují např. kolísání napájecího napětí, ošetření při zacyklení, nesprávném chování

programu apod. Všechny tyto funkce jsou velmi často integrovány do jednoho obvodu a popisovaný bezdrátový modul není výjimkou. Použití daného typu mikroprocesoru je velmi závislé na samotném systému, který bude řízen. V současné době se velmi běžně používají osmibitové mikroprocesory, které lze zařadit spíše do oblasti využití pro pomalé procesy, jako např. regulace teploty. Ve složitějších zařízeních se používají 16 bitové, 32 a někdy i 64 bitové mikroprocesory. Bezdrátový modul je z tohoto hlediska možné využít i pro složitější systémy a spolu s vnitřními programovými algoritmy jej lze využít téměř univerzálně pro různé typy systémů. Svou roli také hraje programovací jazyk, ve kterém jsou aplikace napsány.

Součástí dnešních typů regulátorů bývají také velmi často různá komunikační rozhraní rozšiřující funkci regulátoru, který se tak může stát součástí rozsáhlého distribuovaného řídicího systému. Konkrétní použitelnost takového rozhraní bývá ovšem různá a často se jedná pouze o rozhraní RS232, RS485 apod. Stává, že protokol, podle kterého komunikace probíhá, nebývá popsán a tak je komunikace omezena pouze na zařízení od téhož výrobce. Regulátory mohou být vybaveny také rozhraním, které umožňuje připojení na standardizované průmyslové sběrnice jako např. CAN, Profibus, Foundation Fieldbus apod., popř. mohou být konfigurovatelné s možností připojení k několika různým typům sběrnic. Některé typy regulátorů využívají také rozhraní pro připojení k síti Ethernet (např. 10Base-T) a přenáší tak data protokolem TCP/IP. Zde je možné přiřadit regulátoru jednoznačnou IP adresu, popř. může fungovat jako webový server umožňující monitorovat a ovládat regulační procesy pomocí tzv. tenkých klientů z internetových prohlížečů. Více o webovém serveru a této možnosti monitorování a ovládání technologického procesu, viz [Mahdal, 2006].

Dalším typem rozhraní, se kterým se můžeme setkat především u smart senzorů je právě rozhraní bezdrátové. Regulátor s modulem JN5139 tohoto rozhraní využívá, přičemž tento typ spojení nebude přenášet hodnoty pro akční zásah. Z pohledu konstrukčního se jedná o regulátor kompaktní, kde počet vstupů a výstupů, komunikační rozhraní a přizpůsobovací obvody jsou pevně dány. Parametry regulátoru, žádanou hodnotu či hodnotu poruchy nastavujeme bezdrátově z vytvořeného programu *Jenie Net.*, podokna *Model_TVM_Jenie*, popř. lokálně s připojenou řídicí deskou, na které jsou k dispozici konfigurační tlačítka a LCD displej.

Na obr. 85 můžeme vidět blokové schéma diskretního regulačního obvodu, kde regulovaná soustava představuje spojitý systém v podobě teplovzdušného modelu. Regulovaná veličina je spojitá $y(t)$ a pomocí A/D převodníku (vzorkovače) převedena na diskretní funkci, neboli číslicový tvar $y(kT)$. Regulátor představuje mikroprocesor (modul JN5139) s algoritmem PSD.



Obr. 85 Blokové schéma diskrétního regulačního obvodu s mikroprocesorem JN5139

V tomto případě je součástí regulátoru A/D i D/A převodník, pracující s pevnou vzorkovací periodou. Úloha syntézy tohoto diskrétního regulačního obvodu bude představovat stejně jako pro spojité systémy návrh vhodného typu regulátoru a jeho optimální nastavení parametrů k_p, T_I, T_D . Ještě než se dostaneme k syntéze a identifikaci regulované soustavy, představíme algoritmy použitých PSD regulátorů, které byly programovány do bezdrátového modulu a okno *Model_TVM_Jenie* jako součást *Jenie Net*. aplikace, síť *Jenie*, umožňující vizualizaci a nastavení bezdrátového modulu pro řízení a ovládání technologického procesu.

12.4 Algoritmy PSD regulátorů

Číslicové regulátory označované jako PSD (Proporcionálně-Sumačně-Diferenční) představují diskrétní analogii spojitých PID regulátorů. PSD regulátory se svým chováním v regulačním obvodu přibližují PID spojitým regulátorům, tedy i charakter akční veličiny se při zmenšování periody vzorkování blíží analogovému výstupu. Vycházejme tedy z integrodiferenciální rovnice spojitého PID regulátoru:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (15)$$

a odpovídajícím přenosem vyjádřeným v Laplaceově transformaci

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = r_0 \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right], \quad (16)$$

kde r_0 označuje zesílení PID regulátoru, neboli též proporcionální konstantu regulátoru, integrační časová konstanta je vyjádřena jako $T_I = \frac{r_0}{r_{-1}}$ a derivační $T_D = \frac{r_1}{r_0}$. PSD regulátor má definovanou hodnotu akční veličiny $u(t)$ pouze v diskrétních časových okamžicích $t = kT, k = 0, 1, 2, \dots$. Obecně pro PSD regulátor platí vyjádření:

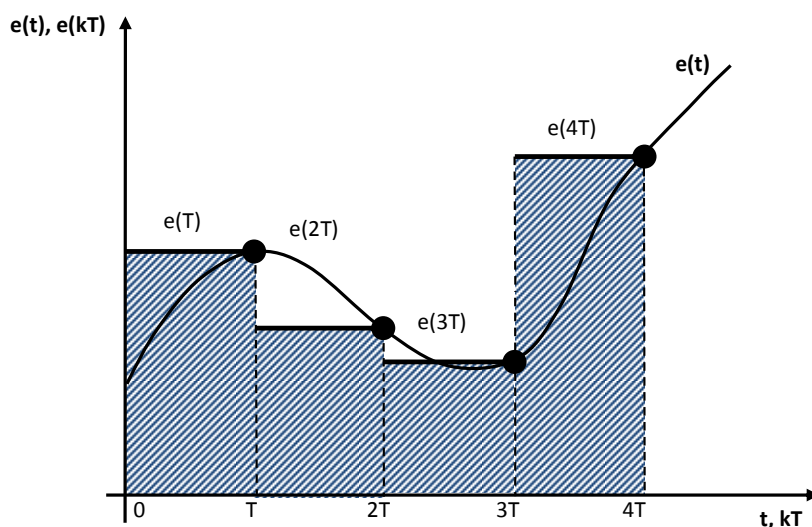
$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) + \frac{1}{T_I} I(kT) + T_D D(kT) \right]. \quad (17)$$

$I(kT)$ je hodnota sumy v diskrétním časovém okamžiku $t = kT$ a $D(kT)$ je hodnota relativní difference v diskrétním časovém okamžiku $t = kT$. Pro výpočet $I(kT)$ a $D(kT)$ je potřeba znát diskrétní hodnoty současné i minulé diskrétní regulační odchylky $e(kT)$. Tyto výpočty se provádějí numericky a používají se přibližné náhrady spojitých algoritmů integrace a derivace.

Pro náhradu spojitých algoritmů integrace se nejčastěji volí zpětná obdélníková náhrada, dopředná obdélníková náhrada nebo lichoběžníková náhrada. Při zpětné obdélníkové náhradě, která je použita v našem algoritmu PSD regulátoru, se hodnota integrálu nahrazuje součtem ploch obdélníků, které nahrazují plochu pod původní spojitou křivkou $e(t)$, viz obr. 86, tedy z rovnice 17 můžeme vyjádřit

$$I(kT) = T \sum_{i=1}^k e(iT) \approx \int_0^{t=kT} e(\tau) d\tau. \quad (18)$$

Obdélníky mají stejnou šířku, která je dána periodou vzorkování a výška i -tého obdélníku je pak dána hodnotou vzorku $e(iT)$ v čase $t = iT$.

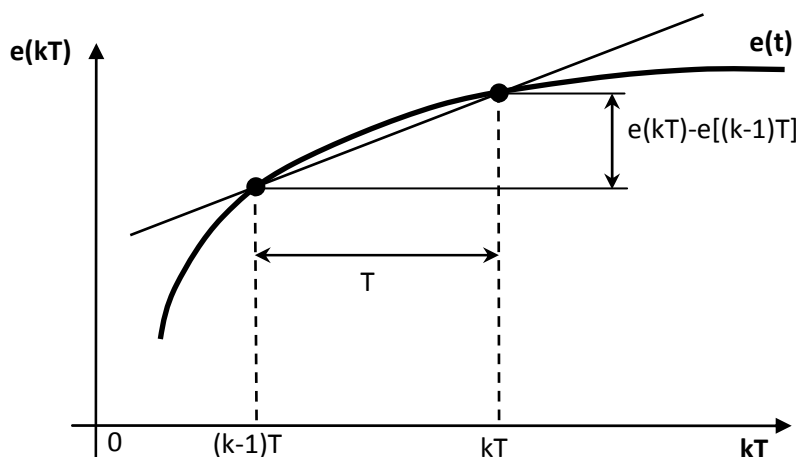


Obr. 86 Zpětná obdélníková náhrada jako náhrada integrace

Náhrada derivace v diskrétním časovém okamžiku $t = kT$ se obvykle realizuje zpětnou diferencí 1. řádu. Z rovnice 17 vyjádříme derivaci $D(kT)$:

$$D(kT) = \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \approx \left. \frac{de(t)}{dt} \right|_{t=kT}. \quad (19)$$

V grafickém vyjádření můžeme zpětnou diferencí 1. řádu vidět na obr. 87.



Obr. 87 Zpětná difference 1. řádu jako náhrada derivace

Zvolené diskrétní náhrady integrálu $I(kT)$ a derivace $D(kT)$ mají samozřejmě vliv na výpočet okamžité hodnoty akční veličiny $u(kT)$ v daném časovém diskrétním okamžiku kT .

Nyní se již přímo zaměříme na algoritmy PSD regulátoru. V disertační práci byly do bezdrátového modulu aplikovány dva typy algoritmů a to polohový algoritmus regulátoru a přírůstkový algoritmus regulátoru. Oba typy byly testovány pro soustavu teplovzdušného modelu. Protože práce nemá hlavní těžiště v porovnání těchto algoritmů (co se do složitosti výpočtů týče), jsou výsledky regulací uvedeny pro polohový algoritmus PSD regulátoru, pro jednotlivé úlohy modelu, viz kapitola 12.8.1.

12.4.1 Polohový algoritmus PSD regulátoru

Polohový algoritmus regulátoru PSD vychází z náhrady integrálu algoritmu spojitěho PID regulátoru zpětnou obdélníkovou metodou a z náhrady derivace pomocí zpětné difference 1. řádu, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Tento algoritmus vypočítává hodnotu akční veličiny $u(kT)$ v diskrétním časovém okamžiku z aktuálních i minulých (v paměti bezdrátového modulu uložených) diskrétních hodnot regulační odchylky e . Algoritmus byl programován s filtrací derivační složky filtrem 1. řádu, což představuje náhradu spojitě derivace derivačním členem se setrvačností 1. řádu

$$T_D \frac{s}{T_f s + 1}, \quad (20)$$

kde T_f představuje časovou konstantu filtru [s].

Rovnici polohového PSD regulátoru s filtrací derivační složky pak můžeme vyjádřit jako

$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} \{ e_f(kT) - e_f[(k-1)T] \} \right], \quad (21)$$

kde $e_f(kT)$ vyjadřuje filtrovanou regulační odchylku v daném okamžiku a $e_f[(k-1)T]$ filtrovanou regulační odchylku v předchozím kroku. Filtrovaná regulační odchylka $e_f(kT)$ se vypočte jako

$$e_f(kT) = (1-a) \cdot e_f[(k-1)T] + a \cdot e(kT), \quad (22)$$

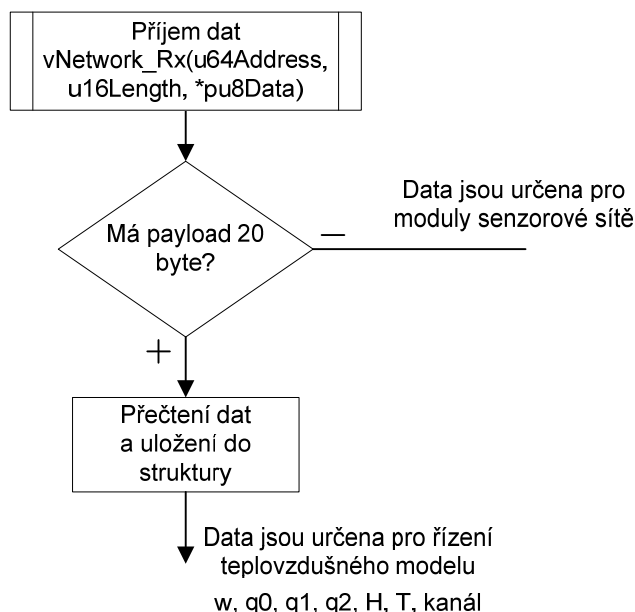
což představuje diferenční rovnici diskrétního filtru 1. řádu, kde a je koeficient filtrace. Pokud se $a = 1$ pak veličina není filtrována. Tento filtr odstraňuje šum regulační odchylky u derivační složky, zároveň však nevnaší setrvačnost do proporcionální a sumační složky regulátoru, což je výhodnější než u filtru řazeného před samotným regulátorem.

Při náhradě integrálu sumací regulačních odchylek (v rovnici 21) je nutné znát aktuální hodnotu a všechny minulé hodnoty diskrétní regulační odchylky $e(iT)$, kde $i = 1, 2, 3 \dots k$. Tedy je zde nutnost a jistá nevýhoda sumace regulačních odchylek, která musí být v paměti ukládána, což při aplikacích do mikroprocesorů může činit problémy, protože máme k dispozici jen omezenou velikost paměti. Moduly JN5139-M00R1 disponují poměrně velkou datovou a programovou pamětí, takže aplikace tohoto typu algoritmu nebyl problém.

Pro náhradu derivace zpětnou diferencí je potřeba ukládat hodnotu regulační odchylky v čase $(k-1)T$, tedy minulý vzorek regulační odchylky a aktuální hodnotu $e(kT)$. I když se tento typ algoritmu PSD regulátoru využívá spíše tam, kde regulátory neobsahují sumační složku, je tento algoritmus pro naše účely univerzálního použití zcela ideální. Vyznačuje se malým zpožděním, což vykazuje dobrou regulaci při prudkých změnách žádané veličiny.

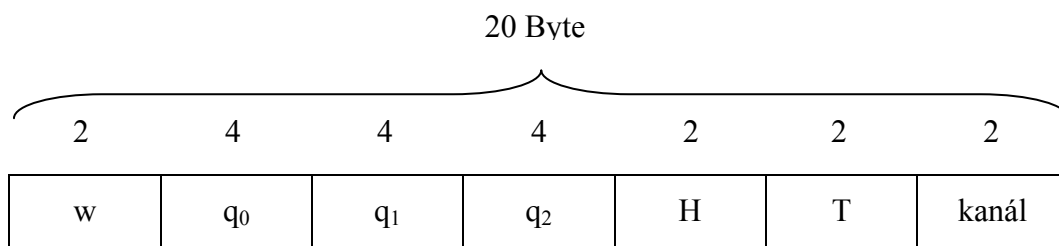
Ještě než si ukážeme, jak vypadá vývojový diagram programu bezdrátového modulu v konfiguraci směrovače, který řídí teplovzdušný model, je potřeba si objasnit, jak tento bezdrátový modul rozpoznává data, která jsou určena právě pro něj. Koordinátor připojený k PC odesílá data do všech stanic, které jsou identifikovány na základě MAC adresy. Protože řízení teplovzdušného modulu a senzorové sítě *Jenie* je spojeno, vzniká tím plošně distribuovaná síť, která je schopna snímat data z bezdrátových modulů (teplota, relativní vlhkost, hodnota napětí akumulátorů apod.) a modulu řídicí technologický proces. Tato část plošně distribuované sítě je popsána, viz kapitola 13. Pokud tedy koordinátor odesílá data do všech bezdrátových stanic této distribuované sítě, musí bezdrátová stanice řídicí technologický proces data přijmout a určit zda jsou data určena pro ni či nikoli. Pro tento účel je možné využít různých podob identifikace v přenášených datech, např. přidáním identifikační hodnoty do přenášených dat apod. Tento způsob má ovšem

nevýhodu vedoucí ke zvýšení obsahu přenášených dat tzv. payload. Identifikace pomocí MAC adresy koordinátoru také není ideální, protože MAC adresa koordinátoru se může měnit (program může být nahrán do libovolného jiného modulu s jinou MAC adresou), a tím nelze staticky u přijímací stanice zaručit stále stejnou adresu. Jedna z možností jak obejít navýšení obsahu přenášených dat a MAC identifikaci je velmi jednoduchá, založená na počtu přenášených Byte, neboli velikosti obsahu payload. Pro bezdrátový modul řídicí technologický proces je tato hodnota jiná, než pro moduly, které jsou ve funkci sběrných stanic senzorové sítě. Bezdrátová stanice tedy provádí testování na příjem velikosti dat, viz obr. 88.



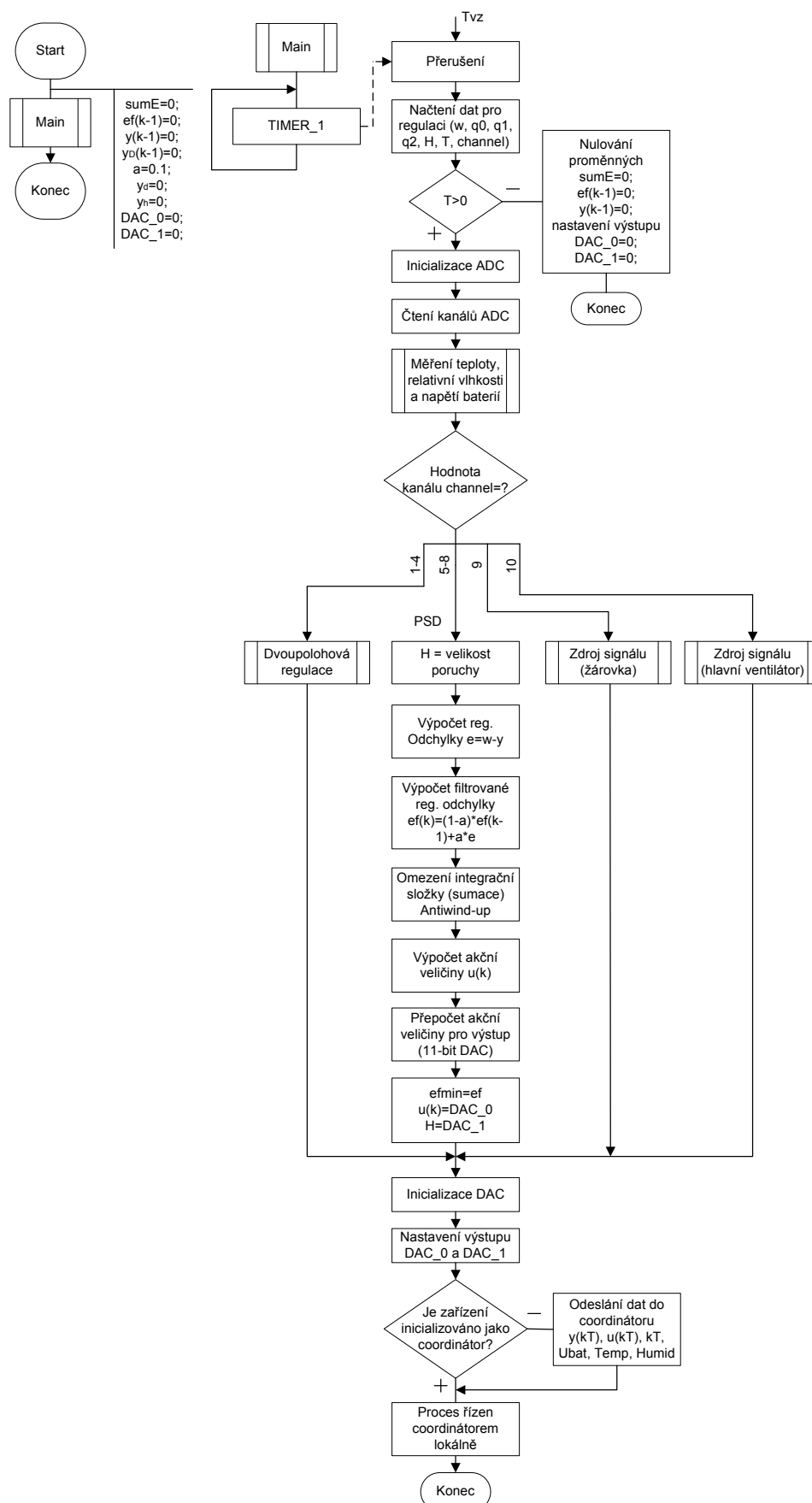
Obr. 88 Vývojový diagram zobrazující testování modulu na počet přijímaných Byte

Funkce `vnetwork_RX(u64Address, u16Length, *pu8Data)` z obr. 88 má tři parametry. Prvním parametrem je adresa stanice, ze které byla data odeslána, druhý parametr představuje délku přenášených dat, na kterou bude provedeno následující testování a poslední parametr představuje pointer na přenesená data. Tato funkce volá další funkci, která data uloží do struktury pro další zpracování programem. Adresa modulu má velikost 8 Byte, délka přenášených dat má velikost 20 Byte a obsah dat pro regulaci a ovládání teplovzdušného modelu má, jak již bylo naznačeno, velikost 20 Byte. Jedná se o datový typ neznaménkových integerů (unsigned integer), viz obr. 89.



Obr. 89 Obsah dat pro regulaci a ovládání teplovzdušného modelu

Vývojový diagram polohového algoritmu PSD regulátoru pro bezdrátový modul, který přímo řídí teplovzdušný model, včetně větveného rozhodování, zda se jedná o dvoupolohovou regulaci, PSD, nebo zdroje signálu, můžeme vidět na obr. 90. Vlivem časovače TIMER_1 dojde k přerušení, během kterého se provádí vlastní výpočet akčního zásahu. Způsob časování a výsledné přerušení je řízeno časovacími obvody s krystalem řízeným oscilátorem a nastavenou periodou vzorkování. V programu jsou načteny přenesená data od koordinátoru, což je velikost žádané hodnoty, dále konstanty q_0, q_1, q_2 , které v tomto případě odpovídají vahám regulátoru $q_0 = r_0, q_1 = r_0 \frac{T}{T_I}, q_2 = r_0 \frac{T_D}{T}$, hodnota hystereze pro dvoupolohovou regulaci, perioda vzorkování a kanál (výběr soustavy), který bude ovládán či řízen, viz obr. 89. Tato data jsou přenášena z aplikace *Jenie Net*. (podokna *Model_TVM_Jenie*), ve které bylo vytvořeno grafické prostředí zobrazující průběh regulace modelu a možnost nastavení všech parametrů regulace či ovládání. Tato aplikace bude popsána v kapitole 12.6 a je součástí sítě *Jenie*.



Obr. 90 Vývojový diagram polohového algoritmu PSD regulátoru pro bezdrátový modul

Po načtení všech dat potřebných k regulaci či ovládání modelu je testována hodnota vzorkovací periody. V případě že je nulová, pak je řízení procesu vypnuto, hodnoty výstupů modulu jsou nastaveny na nulu včetně nulování hodnot proměnných potřebné pro další PSD a dvoupolohovou regulaci. Následně je inicializován A/D převodník pracující v multiplexním režimu a dojde ke čtení všech A/D vstupů. Po vyhodnocení podmínky hodnoty kanálu je dle zaslané hodnoty z *Jenie Net*. aplikace vybrána jednak soustava teplovzdušného modelu a zároveň volba regulace a zdroje signálu. Přenášená hodnota kanálu 1 až 4 říká, že je vybrána dvoupolohová regulace, kde při volbě 1 se jedná o soustavu termistor 1, 2 termistor 2, 3 je termistor 3 a hodnota 4 charakterizuje soustavu vrtulkového průtokoměru. Analogicky je posloupnost označení soustav i pro PSD regulaci mající hodnotu kanálu 5 až 8. Hodnota 9 představuje zdroj signálu (velikost napětí) pro žárovku a hodnota 10 zdroj signálu (velikost napětí) pro hlavní ventilátor. Zdroj signálu slouží k měření přechodových charakteristik pro jednotlivé typy soustav modelu.

Při výběru kanálu pro PSD regulaci představuje přenášená hodnota H (jedná se o hysterezi při dvoupolohové regulaci), která je v tomto případě nepotřebná, velikost poruchy pro soustavy termistorů, což je velikost napětí na hlavním ventilátoru. Tato hodnota má tedy jiný význam pro regulaci PSD a dvoupolohovou. Tímto lze ušetřit opět velikost přenášených dat. Následně je vypočítána regulační odchylka jako rozdíl mezi žádanou hodnotou a aktuálně odečtenou hodnotou z A/D převodníku a vypočtena filtrovaná regulační odchylka.

Algoritmus polohového PSD regulátoru je také programován na omezení sumace (růst integrační složky) a tedy odstranění wind-up efektu, způsobující nepříznivý růst hodnoty výstupní veličiny regulátoru nad její maximální hodnotu. Tzn., integrační složkou může akční zásah přesáhnout maximální hodnotu, protože integrační složka dále narůstá, aniž by se to projevilo na výstupu. Když pak náhle dojde ke změně znaménka regulační odchylky a integrační složka bude klesat, pak trvá určitou dobu, než se tento pokles projeví na hodnotě akční veličiny, tedy než se akční veličina dostane zpět do svého rozsahu. Tímto dojde k velkému podkmitu a regulační proces je kmitavý s dlouhou dobou ustálení, což v určitých případech může způsobit i nestabilitu regulačního obvodu. Programová realizace omezující sumaci regulačních odchylek a odstraňující wind-up efekt, která byla implementována do bezdrátového modulu řídící teplovzdušný model je velmi jednoduchá, protože se jedná o jedinou podmínku:

```
if (((ukvyst >= 2047) & (ek >= 0)) | ((ukvyst <= 0) & (ek <= 0))) {  
    sumE = sumE;  
} else {  
    sumE += ek;  
}
```

Hodnota 2047 představuje maximální hodnotu akčního zásahu pro 11-bitový D/A převodník, což odpovídá maximální hodnotě 10 V na žárovku či hlavní ventilátor.

Po odstranění wind-up efektu je vypočítána hodnota akčního zásahu podle vztahu (21) což je programově vyjádřeno jako:

$$u_k = (sSetTVMDData.u32q0 * ek) + (sSetTVMDData.u32q1 * sumE) + (sSetTVMDData.u32q2 * (ekf - ekfmin));$$

kde $u32q0$, $q1$, $q2$ představují 32 bitové hodnoty struktury *tsSetTVMDData*, které jsou uloženy ihned po příjmu dat bezdrátovým modulem z *Jenie Net.* aplikace, od koordinátoru sítě. Hodnota akční veličiny je následně přepočítána pro výstupy 11-bitových D/A převodníků. Ty jsou následně inicializovány a hodnoty akčních zásahů jsou nastaveny na výstup. Pro výstup na akční člen žárovku je využíván převodník s označením DAC_0 a pro hlavní ventilátor DAC_1. Při volbě soustavy termistorů (kanál 5-7) je výstup nastaven na DAC_0 (napětí na žárovku) a na výstupu DAC_1 (napětí na hlavní ventilátor) je velikost poruchy. Při volbě soustavy vrtulkového průtokoměru je nastavován akční zásah pouze na výstup DAC_1.

Modul řídící teplovzdušný model (technologický proces) může být inicializován jako koncové zařízení (End Device) nebo jako směrovač. Pokud je zařízení koordinátor s implementovaným regulátorem, proces je řízen přímo s přenosem dat do PC přes USB. Vedle hodnot regulované veličiny, akčního zásahu a časového vzorku jsou přenášeny i další měřená data, jako hodnoty napětí napájecích akumulátorů, teplota a relativní vlhkost. Všechna tato data jsou zpracována v *Jenie Net.*, která celý regulační proces vizualizuje. Pro zjednodušení a přehlednost není ve vývojovém diagramu znázorněno měření a výpočet napětí akumulátoru, teploty a relativní vlhkosti z A/D kanálů a rovněž testování přetečení proměnných.

Výsledky regulací pro všechny typy soustav teplovzdušného modelu řízeného bezdrátovým modulem s ukázkou anti wind-up efektu můžeme vidět v kapitole 12.8.1 pro koeficient filtrace $a = 0,1$. Nevýhodu sumace regulačních odchylek odstraňuje přírůstkový algoritmus PSD regulátoru.

12.4.2 Přírůstkový algoritmus PSD regulátoru

Tento typ algoritmu má rekurentní charakter a v diskrétním časovém okamžiku kT není určována okamžitá hodnota akční veličiny $u(kT)$, ale pouze její kladný či záporný přírůstek $\nabla u(kT)$ vůči hodnotě akční veličiny $u[(k-1)T]$ v předchozím diskrétním časovém okamžiku.

$$\nabla u(kT) = u(kT) - u[(k-1)T]. \quad (23)$$

Tedy aktuální hodnota akční veličiny v diskrétním časovém okamžiku kT je rovna:

$$u(kT) = r_0 \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} [e(kT) - e[(k-1)T]] \right\}, \quad (24)$$

a hodnota akční veličiny $u[(k-1)T]$ v předchozím diskrétním časovém okamžiku je rovna:

$$u[(k-1)T] = r_0 \left\{ e[(k-1)T] + \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^{k-1} e(iT) + \frac{T_D}{T} [e[(k-1)T] - e[(k-2)T]] \right\}. \quad (25)$$

Z rovnice 23 můžeme vyjádřit přírůstek akční veličiny a přímo tak vyjádřit rovnici přírůstkového algoritmu:

$$\begin{aligned} \nabla u(kT) &= u(kT) - u[(k-1)T] = \\ &= r_0 \left\{ \{e(kT) - e[(k-1)T]\} + \frac{T}{T_I} \left\{ \sum_{i=1}^k e(iT) - \sum_{i=1}^{k-1} e(iT) \right\} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_D}{T} \{e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]\} \right\} = \\ &= r_0 \left\{ \{e(kT) - e[(k-1)T]\} + \frac{T}{T_I} e(kT) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_D}{T} \{e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T]\} \right\} = \\ &= q_0 e(kT) + q_1 e[(k-1)T] + q_2 e[(k-2)T]. \end{aligned} \quad (26)$$

q_0, q_1, q_2 jsou konstanty pro přírůstkový tvar algoritmu regulátoru a pro námi použitou zpětnou obdélníkovou náhradu integrálu se tyto konstanty vyjádří jako

$$q_0 = r_0 \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) \quad q_1 = -r_0 \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) \quad q_2 = r_0 \frac{T_D}{T}. \quad (27)$$

U tohoto typu PSD regulátoru je tedy hodnota akčního zásahu $u(kT)$ funkcí současné regulační odchylky, předcházející regulační odchylky, předcházejícího akčního zásahu a před-předcházející regulační odchylky

$$u(kT) = f[e(kT), e[(k-1)T], u(kT), e[(k-2)T]]. \quad (28)$$

Tento typ přírůstkového algoritmu regulátoru je možné použít pro regulátory obsahující sumační složku. Tedy pro regulátory typu S, PS, PSD, jinak by mohlo dojít v případě ustáleného stavu k rozpojení regulačního obvodu. Tedy když:

$$\nabla u(kT) = r_0 \left\{ \nabla e(kT) + \frac{T}{T_I} e(kT) + \frac{T_D}{T} \nabla^2 e(kT) \right\}, \quad (29)$$

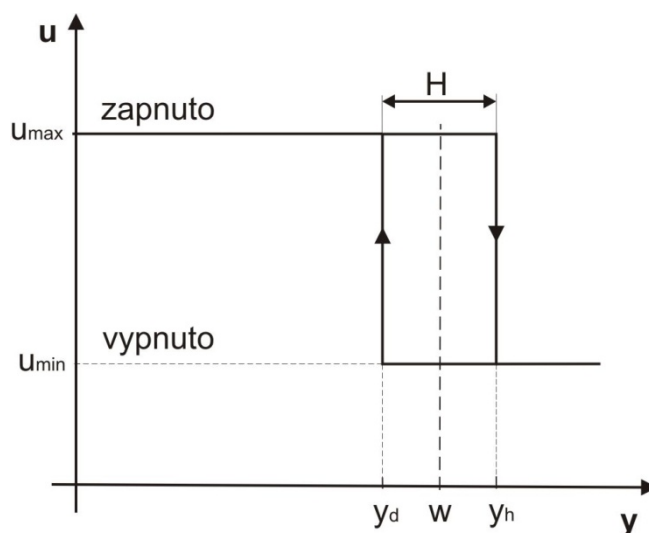
a pro ustálený stav bude platit

$\nabla e(kT) = \nabla^2 e(kT) = 0$, pak z rovnice 25 je vidět, že regulační odchylka vystupuje pouze u sumační složky a v případě její nepřítomnosti a pro výše uvedený ustálený stav bude $\nabla u(kT) = 0$. Pro naše účely a zvolené regulované soustavy je přírůstkový algoritmus rovněž vhodný, nicméně pro regulaci a konečné testování byl vybrán algoritmus polohový.

Vývojový diagram přírůstkového algoritmu PSD regulátoru pro bezdrátový modul je obdobný jako pro polohový regulátor, kromě způsobu výpočtu akčního zásahu (přírůstku), viz obr. 90.

12.5 Algoritmus dvoupolohového regulátoru

Jako další typ regulace, která byla implementována do bezdrátového modulu řídicí teplovzdušný model, je regulace dvoupolohová. U dvoupolohové regulace regulovaná veličina kmitá kolem žádané hodnoty. Pokud nebudeme uvažovat možnost nastavení hystereze, pak regulátor pracuje tak, že pokud hodnota regulované veličiny poklesne pod žádanou hodnotu, akční veličina nabude určité pevné hodnoty, nejčastěji u_{\max} z hlediska rozsahu akční veličiny. Naopak pokud hodnota regulované veličiny překročí žádanou hodnotu, nabude akční veličina jiné pevné hodnoty u_{\min} , která bývá zpravidla nulová. Tento způsob regulace má nevýhodu v častém spínání akční veličiny, což má za následek snížení životnosti výkonových členů. K tomuto nejvíce dochází při malých oscilacích regulované veličiny kolem žádané hodnoty. Aby nedocházelo k tak častému spínání akční veličiny, zavádí se do statické charakteristiky dvoupolohového regulátoru hystereze, viz obr. 91.



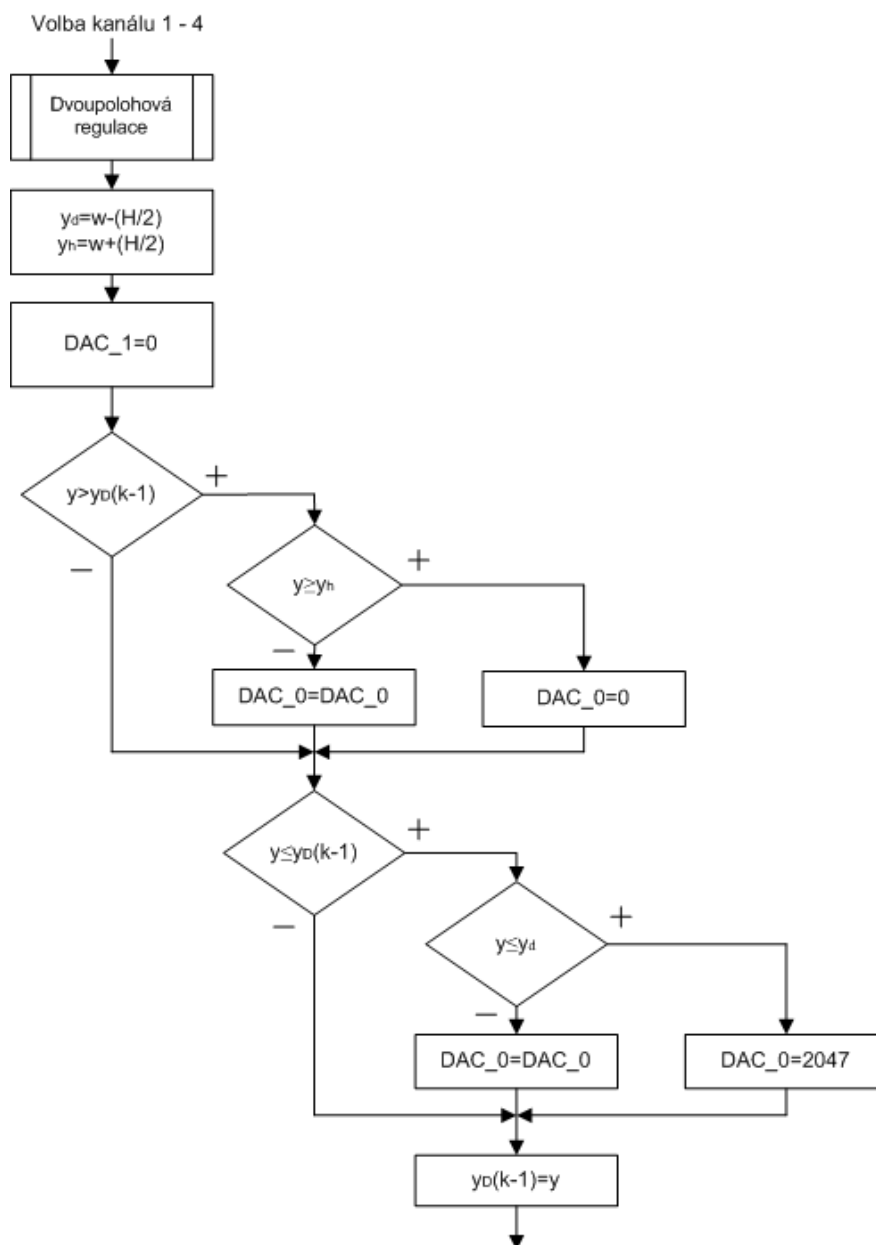
Obr. 91 Statická charakteristika dvoupolohového regulátoru s hysterezí

Velikost hystereze je dána rozdílem hodnoty $H = y_h - y_d$. y_h a y_d jsou vypočteny v prostředí Control Web v aplikaci *Jenie Net.*, okně pro řízení TVM modelu, kde uživatelem zadaná hodnota hystereze je přepočtena pro 12-bitový A/D převodník mikroprocesoru bezdrátového modulu:

```
Hysteresis_real = (((4095/10) * JenieControlParameters[4]) / 2);  
Hysteresis_card = round( Hysteresis_real );  
Hysteresis = str( Hysteresis_card,10 );
```

JenieControlParameters[4] představuje pole s datovým typem *real*, do kterého je uložena uživatelem zadaná hodnota hystereze. Jednotlivé položky pro regulaci modelu dvoupolohovou regulací v *Jenie Net*. můžeme vidět v kapitole 12.6 na obr. 94. Dále je v kódu vidět, že poloviční hystereze je zaokrouhlena pomocí funkce *round()* na celé číslo a dále pomocí funkce *str()* převedena na textový řetězec, který je pak spolu s ostatními hodnotami přenesen do koordinátoru sítě. Ten data odešle do modulu řídicí teplovzdušný model. Tento přepočet je na straně PC proveden z důvodu úspory dalších operací v mikroprocesoru bezdrátového modulu, jako je např. dělení či potřeba zaokrouhlení apod. Tímto způsobem je převedena i hodnota žádané veličiny.

Bezdrátový modul řídicí model má naprogramovanou dvoupolohovou regulaci podle vývojového diagramu, viz obr. 92, který navazuje na vývojový diagram na obr. 90, při volbě kanálu 1 až 4. Vývojový diagram je zobrazen pro regulaci soustav termistorů. Pro vybranou soustavu vrtulkový průtokoměr je potřeba zaměnit DAC_1 za DAC_0 a naopak.



Obr. 92 Vývojový diagram pro dvoupolohovou regulaci

Na začátku regulace je vypočtena hodnota y_h a y_d jako rozdíl žádané hodnoty a poloviny hystereze, která byla vypočtena v prostředí *Model_TVM_Jenie* aplikace *Jenie Net.* a odeslána v podobě velikosti hodnoty A/D převodníku (0-4095). Následně je dle volby kanálu nastaven nevyužívaný D/A výstup na nulu, aby např. nedocházelo k ohřevu vlákna žárovky v případě, kdy jsou regulovány otáčky vrtulkového průtokoměru. Algoritmus dvoupolohové regulace sleduje rozdíl okamžité hodnoty y získané čtením příslušného A/D kanálu a její minulé hodnoty $y_D(k-1)$. Tímto lze sledovat trend regulované veličiny, zda je rostoucí nebo klesající. Jinými slovy pokud je trend rostoucí, dojde k testování regulované veličiny na horní hranici požadované hodnoty y_h a pokud je klesající, je testována na dolní hranici y_d . Pokud je trend regulované veličiny rostoucí a hodnota dosáhla horní hranice nebo ji překročila, je akční zásah vypnut. Pokud

nepřekročila tuto horní hranici, je ponechán předchozí stav akčního zásahu, v tomto případě zapnuto. Naopak při klesajícím trendu regulované veličiny, kdy její hodnota dosáhne spodní hranici nebo poklesne pod tuto mez, je nastaven akční zásah na hodnotu zapnuto. Pokud nedošlo k poklesnutí je ponechán předchozí stav akčního zásahu, v tomto případě vypnuto. Hodnota vypnuto je programově nastavena na hodnotu 0 V a hodnota zapnuto odpovídá maximálnímu akčnímu zásahu, tedy 10 V. A to jak pro případ zvolené úlohy termistorů, tak pro soustavu vrtulkového průtokoměru. Samozřejmě byly také testovány i jiné hodnoty velikosti akčního zásahu a jejich vliv na regulaci. Výsledky dvoupolohové regulace jak pro vybranou soustavu termistor T1, tak i pro vrtulkový průtokoměr můžeme vidět v kapitole 12.8.2.

V případě volby zdroje signálu, viz obr. 90, je dle kanálu nastavena skoková změna velikosti napětí na žárovce či hlavním ventilátoru modelu. Hodnoty zadané uživatelem v prostředí *Model_TVM_Jenie* jsou přímo přepočteny pro 11-bitové D/A převodníky, stejně jako v případě dvoupolohové regulace:

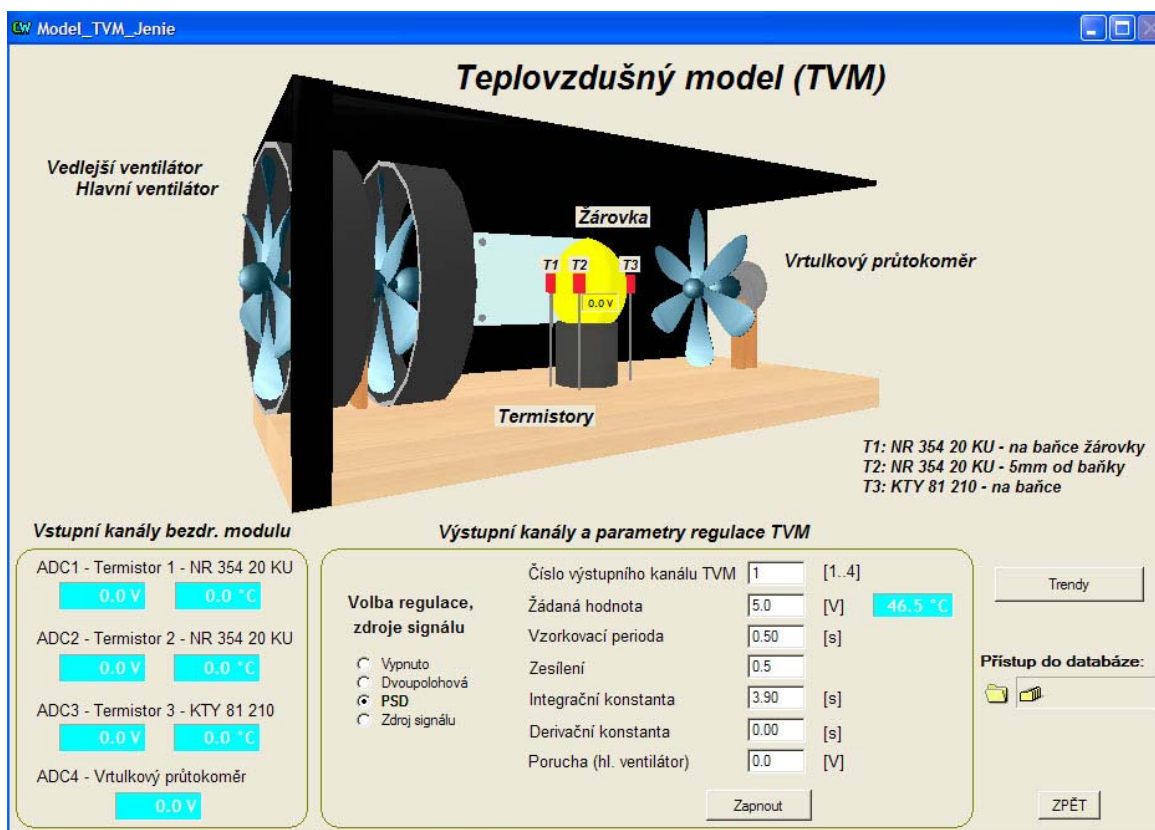
$$\text{Desired_real} = ((2047/10) * \text{JenieControlParameters}[2]);$$

Takže bezdrátový modul může tyto hodnoty přímo nastavit na své výstupy. *JenieControlParameters[2]* je pole datového typu real, do kterého je uložena uživatelem zadaná hodnota skokové změny. Poté dojde k zaokrouhlení hodnoty na celé číslo a k převodu na textový řetězec. Pak může být hodnota spolu s ostatními odeslána.

12.6 Jenie Net. pro podporu řízení teplovzdušného modelu

Aby bylo možné vzdáleně vizualizovat, ovládat a nastavovat parametry regulace bezdrátového modulu řídicího připojený teplovzdušný model, bylo vytvořeno v aplikaci *Jenie Net.* další okno s názvem *Model_TVM_Jenie*. Toto okno je součástí sítě *Jenie*, která tvoří plošně distribuovanou síť bezdrátových stanic.

Pokud v *Jenie Net.* aplikaci zvolíme tlačítkem volbu senzorové sítě *Jenie*, pak v tomto okně je možnost vybrat tlačítkem *Model TVM* ovládání teplovzdušného modelu. Okno pro vizualizaci, bezdrátové ovládání a nastavování parametrů regulátorů implementovaných do bezdrátového modulu řídicího teplovzdušný model, můžeme vidět na obr. 93.



Obr. 93 Okno pro vizualizaci, bezdrátové ovládání a nastavování parametrů pro řízení TVM

V horní části okna je vizualizace teplovzdušného modelu, znázorňující chod ventilátorů (hlavního a vedlejšího), žárovky a vrtulkového průtokoměru. Základní část tohoto 3D modelu, kromě hlavního, vedlejšího ventilátoru a vrtulkového průtokoměru byla vytvořena v programu 3D Studio Max. Tento model byl importován do prostředí Control Web, kde se dopracovaly a oživily další komponenty. Ve spodní levé části tohoto okna jsou hodnoty napětí z A/D kanálů a dle statické charakteristiky pro jednotlivé soustavy TVM modelu také příslušný přepočtení na stupně Celsia. Kanály A/D1 až A/D3 jsou pro soustavy termistorů, A/D4 pro soustavu vrtulkového průtokoměru. Ve střední části je možné uživatelsky zvolit typ regulace. Je zde možnost dvoupolohové regulace, PSD

regulace a zdroje signálu pro měření přechodové charakteristiky. Při volbě dvupolohové regulace, viz obr. 94, máme možnost zvolit číslo výstupního kanálu TVM (soustavu, kterou budeme regulovat), nastavit žádanou hodnotu, která je přepočtena na stupně celsia, vzorkovací periodu a hodnotu hystereze rovněž s přepočtem na stupně Celsia. Hodnota napětí pro žárovku a ventilátor jako akční člen je nastavena na 0 V pro hodnotu vypnuto a 10 V pro stav zapnuto. Tento parametr je možné měnit pouze programově.

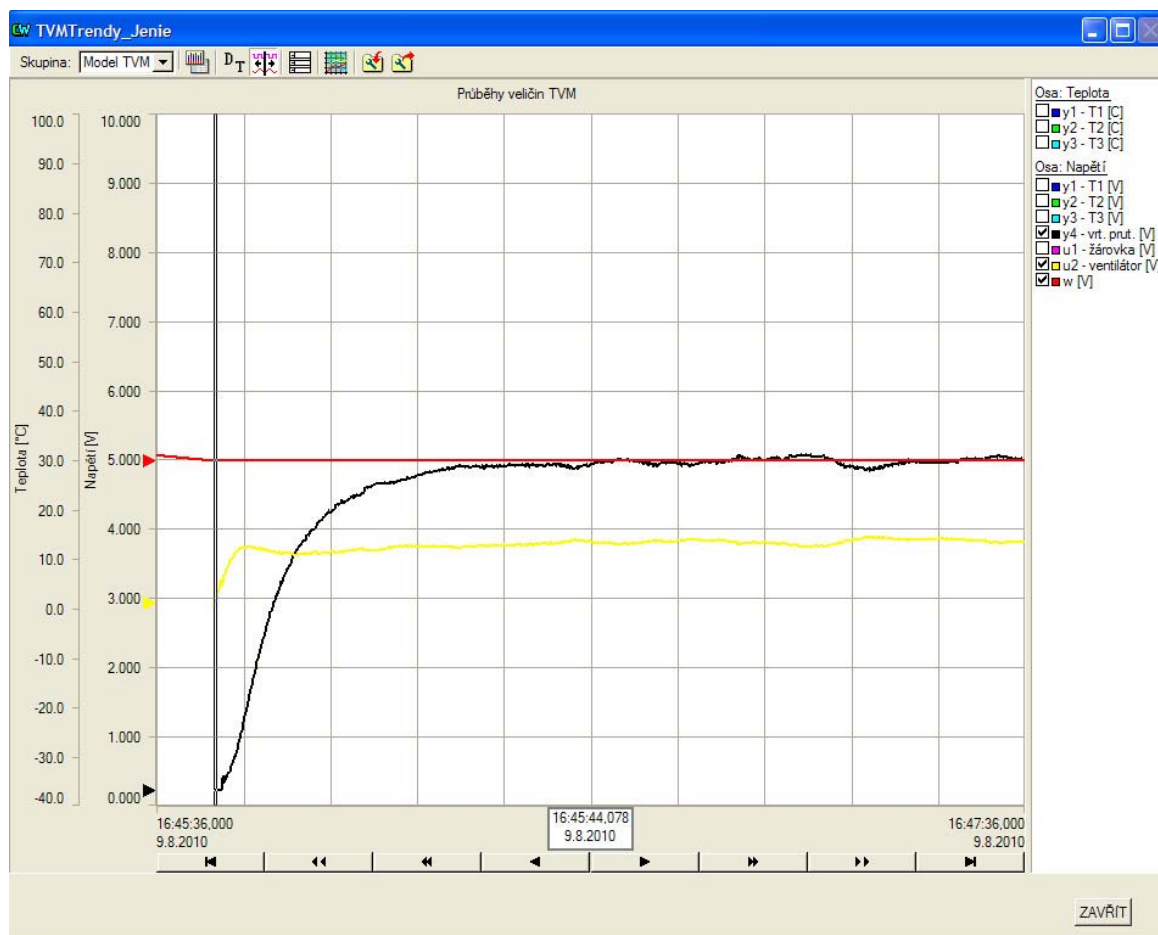
Výstupní kanály a parametry regulace TVM

Volba regulace, zdroje signálu <input type="radio"/> Vypnuto <input checked="" type="radio"/> Dvupolohová <input type="radio"/> PSD <input type="radio"/> Zdroj signálu	Číslo výstupního kanálu TVM	<input type="text" value="1"/>	[1..4]	
	Žádaná hodnota	<input type="text" value="5.0"/>	[V]	46.5 °C
	Vzorkovací perioda	<input type="text" value="0.50"/>	[s]	
	Hystereze	<input type="text" value="1.0"/>	[V]	5.9 °C
	Hodnota vypnuto	0	[V]	
	Hodnota zapnuto	10	[V]	

Obr. 94 Výběr a nastavení parametrů pro dvupolohovou regulaci

Při výběru PSD regulace máme možnost nastavit výstupní kanál TVM (volba soustavy), žádanou hodnotu s přepočtem na stupně Celsia, velikost poruchy, ale také vzorkovací periodu a parametry pro PSD regulátor. Jeho zesílení, integrační a derivační časovou konstantu, viz obr. 93. Výpočet a převod vah regulátoru se provádí přímo v aplikaci *Jenie Net*. a do bezdrátového modulu se odesílají již upravené hodnoty, které bezdrátový modul nemusí dále zpracovávat, čímž šetří výpočetními operacemi. Hlavním programem řídicí odesílání dat do bezdrátového modulu je program *SendPSDRegul*, který ve své událostní proceduře převádí, vypočítává a odesílá uživatelská data pro regulaci modelu. Program je spouštěn tlačítkem *Zapnout* popř. *Vypnout*, viz obr. 94. Program pro příjem dat od koordinátoru sítě má v *Jenie Net*. aplikaci název *PRPrijem*, zpracovávající data ze senzorové sítě *Jenie* a *ATJenie*.

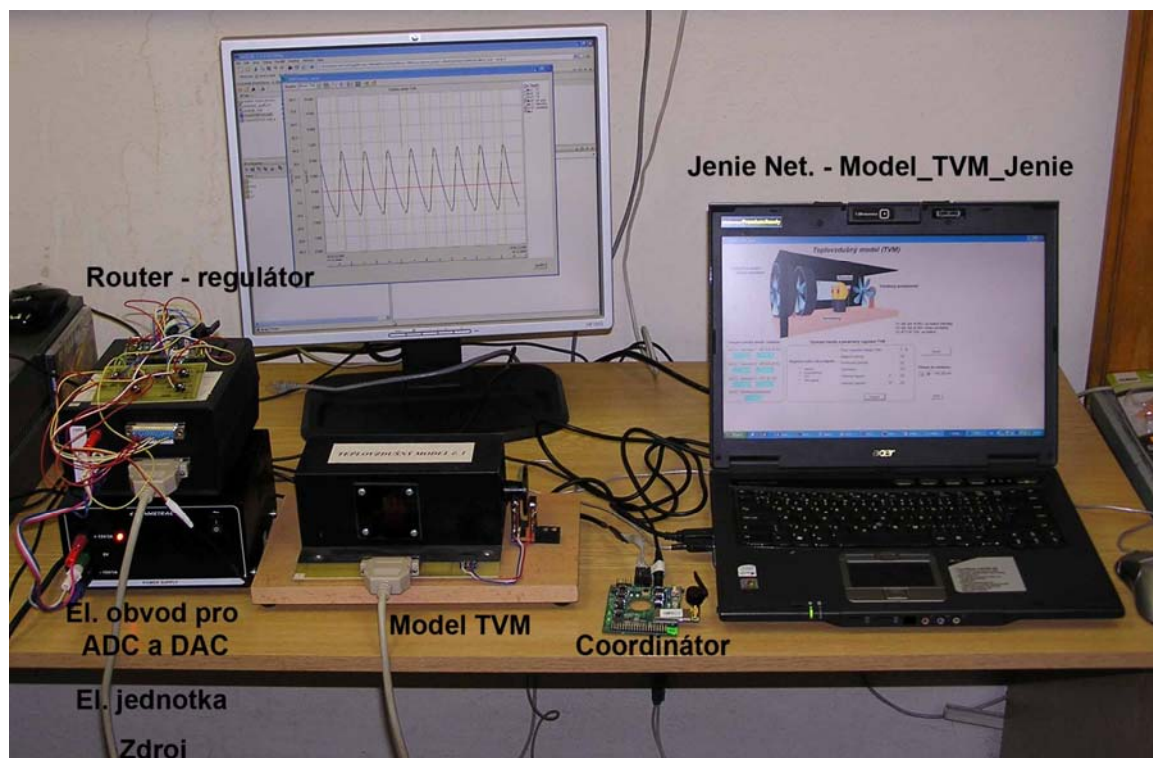
V událostní proceduře *OnActivate()* se nejdříve rozliší, o jaká přichází data se jedná, z jaké sítě pocházejí a v případě sítě *Jenie* se zavolá uživatelská procedura *InputJenie()*, ve které je naprogramován příjem vstupních textových řetězců od zařízení, resp. z ASCII ovladače. Zde dochází k dekodování přijatých řetězců, převodu na číselnou podobu a vizualizačnímu zobrazení do 3D modelu a dalších zobrazovacích polí. Okno *Model_TVM_Jenie* nabízí také sledování průběhů zvolených regulací či měřených přechodových charakteristik, které nalezneme pod tlačítkem *Trendy*. Ukázkou trendu pro PSD regulaci soustavy vrtulkového průtokoměru teplovzdušného modelu můžeme vidět na obr. 95. Pokud vybereme regulaci soustav termistorů, pak regulovaná veličina může být zobrazena jak v jednotkách voltů, tak ve stupních Celsia. Další možností je také zastavení daného průběhu a pohyb v časové oblasti tam i zpět. Nechybí také možnost zobrazení dat v tabulce a úprava zobrazovaných os.



Obr. 95 Trend pro PSD regulaci soustavy vrtulkového průtokoměru

Poslední funkcí v okně *Model_TVM_Jenie* je ukládání a přístup k datům databáze. Veškerá data z regulačního procesu jsou ukládána do *.DBF souborů, kde samotný archiver ukládající data uchovává ve vyrovnávací paměti 100 záznamů. Soubor je zakládán permanentně a zakládání se řídí maskou *TVM_@@@*, kde znaky představují číselné označení a tím i pořadí vytvořených souborů. Ve vytvořeném souboru je možné zachytit až 24 hodinový záznam.

Na obr. 96 můžeme vidět celou sestavu řízení teplovzdušného modelu s vizualizací procesních dat v *Jenie Net.* aplikaci. Tato sestava odpovídá blokovému schématu na obr. 84.



Obr. 96 Celá sestava řízení teplovzdušného modelu

Modul řídicí TVM je ve funkci směrovače a je přímo bezdrátově spojen s koordinátorem sítě, což je ideální případ, protože nevznikají latence v přenosu při průchodu dat od zdroje k cíli přes další bezdrátové moduly (směrovače). Pokud by tento případ dalších připojených stanic nastal, nevzniká výrazný problém, protože *Jenie Net.* aplikace přijímá procesní data pouze pro vizualizaci a jejich záznamu s možností bezdrátového nastavení parametrů regulace. V případě výpadku signálu mezi směrovačem a koordinátorem je proces nadále řízen a směrovač se snaží okamžitě navázat komunikaci se svým rodičem. V této konfiguraci mohou být ke směrovači připojeny další bezdrátové stanice senzorové sítě *Jenie* a tedy může dojít ke spojení senzorové sítě a sítě pro řízení teplovzdušného modelu. Sít' pro řízení teplovzdušného modelu se tak stává součástí plošně distribuované senzorové sítě *Jenie*, viz kapitola 13.

12.7 Identifikace teplovzdušného modelu

Pro syntézu regulačního obvodu s teplovzdušným modelem bylo potřeba provést identifikaci soustav modelu a pomocí aproximací změřených charakteristik získat odpovídající přenosy. Pro konkrétní teplovzdušný model (model č. 1) bylo potřeba dle navržené aplikace v prostředí *Jenie Net*. provést měření přechodové charakteristiky pro všechny 4 výstupy, tedy pro 3 typy termistorů a pro vrtulkový průtokoměr. Uživatel má v aplikaci možnost volby regulační úlohy, a proto je nezbytné provést identifikaci pro všechny zmíněné výstupy.

Aproximace přechodových charakteristik patří mezi deterministické metody a pro jejich správné použití je velmi důležitá znalost typů odezev základních přenosových členů. Na počátku měření přechodové charakteristiky vycházíme z rovnovážného stavu soustavy a měříme odezvu systému na skokovou změnu známé velikosti, která v našem případě odpovídá napětí na žárovce.

Pro měření přechodové charakteristiky, prvních 3 výstupů teplovzdušné soustavy (termistorů) byla použita skoková změna o velikosti 7 V dodávaných elektronikou jednotkou na žárovku. Při měření přechodové charakteristiky pro výstup č. 4 (vrtulkový průtokoměr) se jedná o stejnou velikost skokové změny, ale na hlavní ventilátor. Měřilo se při periodě vzorkování 0,5 s pro soustavu termistorů a 0,1 s pro vrtulkový průtokoměr až do ustáleného stavu výstupní veličiny.

Naměřené přechodové charakteristiky pro soustavy termistorů se aproximovaly proporcionálními soustavami se setrvačností 1. řádu. Pro soustavu vrtulkového průtokoměru pak aproximací pomocí metody dvou bodů odezvy, přenosem soustavou 1. řádu s dopravním zpožděním.

Podrobný popis použitých metod aproximací přechodových charakteristik, viz [Noskiewicz 1999] a [Šulc, Vítečková 2004].

12.7.1 Identifikace pro výstup č. 1 – soustavy termistoru NR 354 20 KU umístěného na baňce žárovky

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, pro identifikaci výstupu č. 1, neboli soustavy termistoru umístěného na baňce žárovky, byla použita aproximace přechodové charakteristiky proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu. Z přechodové charakteristiky, viz obr. 97 můžeme vidět, že v měřeném čase 150 s nevykazuje soustava ustálený stav, a proto byl ustálený stav dopočten pomocí grafické konstrukce ustálené hodnoty. Metoda grafické konstrukce ustálené hodnoty, viz [Šulc, Vítečková 2004]. Tato metoda se používá ke konstrukci ustálené hodnoty při velkých časových konstantách soustavy. Výsledná aproximace byla provedena jak s grafickou konstrukcí ustálené hodnoty soustavy, tak s ustálenou hodnotou bez grafické konstrukce. Ve výsledku při syntéze regulačního obvodu se tento rozdíl projeví velmi malou měrou ve vypočtených parametrech regulátoru. Hlavním záměrem bylo především při identifikaci soustavy obsáhnout dynamiku soustavy.

Pro identifikaci soustavy stanovíme časovou konstantu T_l pomocí tečny k přechodové charakteristice v počátku, nebo z hodnoty $0,63y_\infty$ resp. $0,95y_\infty$.

Identifikace s grafickou konstrukcí ustáleného stavu soustavy:

Ustálené hodnoty vstupní veličiny, výstupní veličiny (s grafickou konstrukcí) a počáteční podmínka (stav)

$$u_\infty = 7 V, y_\infty^* = 7,3 V, y_0^* = 0,16 V, \text{ kde}$$

y_∞^* - skutečná ustálená hodnota výstupní veličiny (s počáteční podmínkou)

y_0^* - počáteční podmínka (hodnota napětí odpovídající okolní teplotě)

y_∞ - vypočtená ustálená hodnota výstupní veličiny

Výpočet ustálené hodnoty výstupní veličiny

$$y_\infty = y_\infty^* - y_0^* = 7,3 - 0,16 = 7,14 V. \quad (30)$$

Zesílení K je určeno z poměru ustálených hodnot výstupu a vstupu

$$K = \frac{y_\infty}{u_\infty} = \frac{7,14}{7} = 1,02. \quad (31)$$

Pro určení setrvačné časové konstanty T_l musíme určit čas, kdy dosáhneme 63% ustálené hodnoty přechodové charakteristiky, kde je potřeba počítat s počáteční podmínkou (okolní teplotou).

$$y_{0,63}^* = 0,63 \cdot y_\infty + y_0^* = 4,4982 + 0,16 = 4,6582 V. \quad (32)$$

$$t_{0,63}^* = 25,88 s \rightarrow T_l = 25,88 s. \quad (33)$$

Po dosazení dostáváme výsledný přenos soustavy

$$G_s(s) = \frac{1,02}{25,88s + 1}. \quad (34)$$

Identifikace bez grafické konstrukce ustáleného stavu soustavy:

Ustálené hodnoty vstupní veličiny, výstupní veličiny (s grafickou konstrukcí) a počáteční podmínka (stav)

$$u_\infty = 7 V, y_\infty^* = 7,15 V, y_0^* = 0,16 V.$$

Výpočet ustálené hodnoty výstupní veličiny

$$y_\infty = y_\infty^* - y_0^* = 7,15 - 0,16 = 6,99 V. \quad (35)$$

Zesílení K je určeno z poměru ustálených hodnot výstupu a vstupu

$$K = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{6,99}{7} = 1. \quad (36)$$

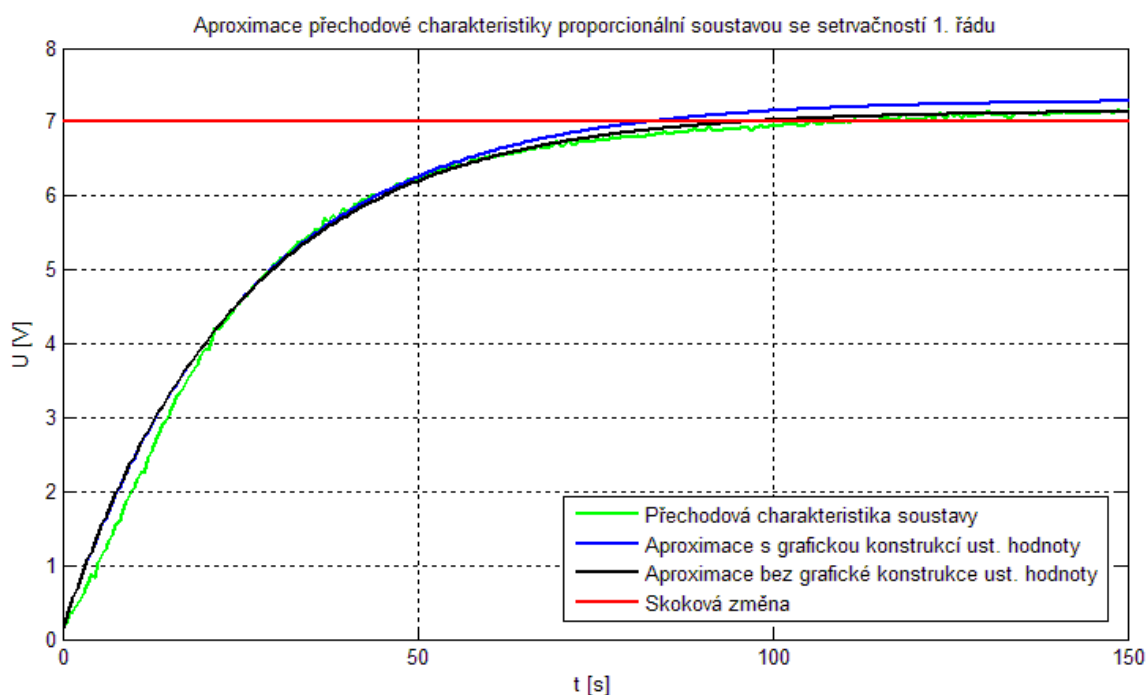
Pro určení setrvačné časové konstanty T_l musíme určit čas, kdy dosáhneme 63% ustálené hodnoty přechodové charakteristiky, kde je potřeba počítat s počáteční podmínkou (okolní teplotou).

$$y_{0,63}^* = 0,63 \cdot y_{\infty} + y_0^* = 4,4037 + 0,16 = 4,5637 V. \quad (37)$$

$$t_{0,63}^* = 25,03 s \rightarrow T_l = 25,03 s. \quad (38)$$

Po dosazení dostáváme výsledný přenos soustavy

$$G_s(s) = \frac{1,00}{25,03s + 1}. \quad (39)$$



Obr. 97 Srovnání aproximací soustavy s grafickou a bez grafické konstrukce ustálené hodnoty soustavy – termistor T1

Pro zbylé soustavy termistorů byla identifikace rovněž provedena oběma metodami, s grafickou i bez grafické konstrukce ustálené hodnoty soustavy, ovšem pro syntézu regulačního obvodu a návrh parametrů regulátoru byl použit náhradní přenos získaný aproximací s grafickou konstrukcí ustálené hodnoty, která v náhradním přenosu lépe vystihuje dynamický charakter soustavy.

12.7.2 Identifikace pro výstup č. 2 – soustavy termistoru NR 354 20 KU umístěný 5 mm od baňky žárovky.

Pro identifikaci výstupu č. 2 neboli termistoru umístěného 5 mm od baňky žárovky platí

Identifikace s grafickou konstrukcí ustáleného stavu soustavy:

Ustálené hodnoty vstupní veličiny, výstupní veličiny a počáteční podmínka (stav)

$$u_{\infty} = 7 V, \quad y_{\infty}^* = 4,56 V, \quad y_0^* = 0,39 V.$$

Výpočet ustálené hodnoty výstupní veličiny

$$y_{\infty} = y_{\infty}^* - y_0^* = 4,56 - 0,39 = 4,17 V. \quad (40)$$

Zesílení K

$$K = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{4,17}{7} = 0,6. \quad (41)$$

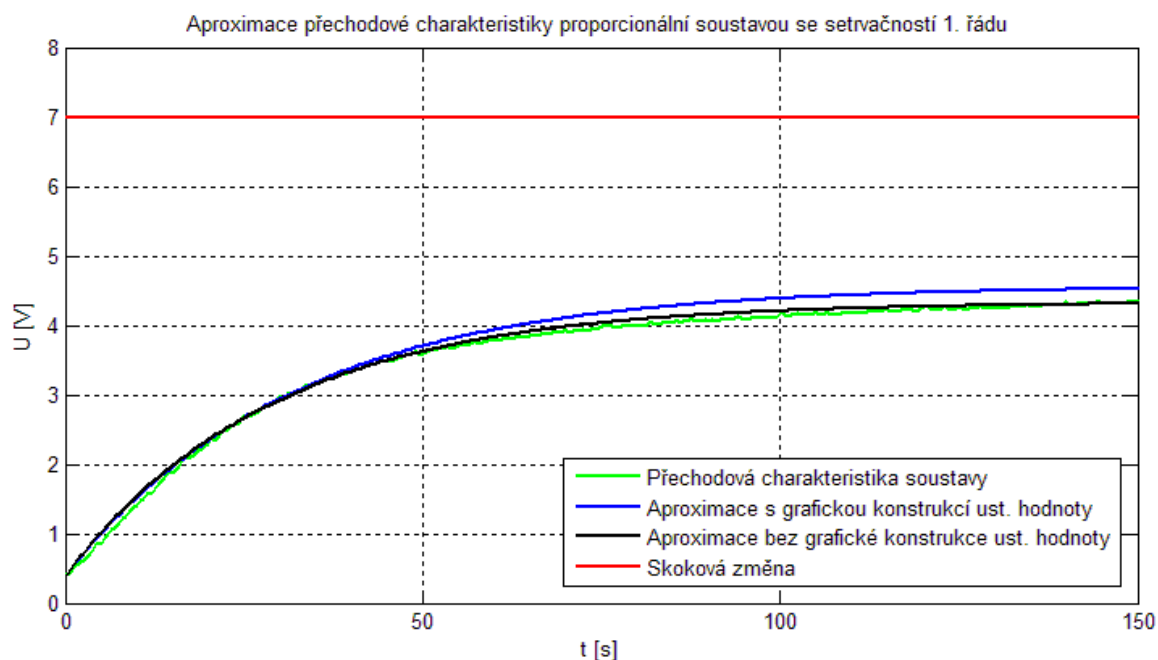
Pro určení setrvačné časové konstanty T_l platí

$$y_{0,63}^* = 0,63 \cdot y_{\infty}^* + y_0^* = 3,0171 V. \quad (42)$$

$$t_{0,63}^* = 31,62 s \rightarrow T_l = 31,62 s. \quad (43)$$

Po dosazení dostáváme výsledný přenos soustavy

$$G_s(s) = \frac{0,60}{31,62s + 1}. \quad (44)$$



Obr. 98 Srovnání aproximací soustavy s grafickou a bez grafické konstrukce ustálené hodnoty soustavy – termistor T2

12.7.3 Identifikace pro výstup č. 3 – měřený termistor KTY 81 210 umístěný na baňce žárovky

Identifikace s grafickou konstrukcí ustáleného stavu soustavy:

Ustálené hodnoty vstupní veličiny, výstupní veličiny a počáteční podmínka (stav)

$$u_{\infty} = 7 \text{ V}, y_{\infty}^* = 5,17 \text{ V}, y_0^* = 0,03 \text{ V}$$

Výpočet ustálené hodnoty výstupní veličiny

$$y_{\infty} = y_{\infty}^* - y_0^* = 5,17 - 0,03 = 5,14 \text{ V}. \quad (45)$$

Zesílení K

$$K = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{5,14}{7} = 0,73. \quad (46)$$

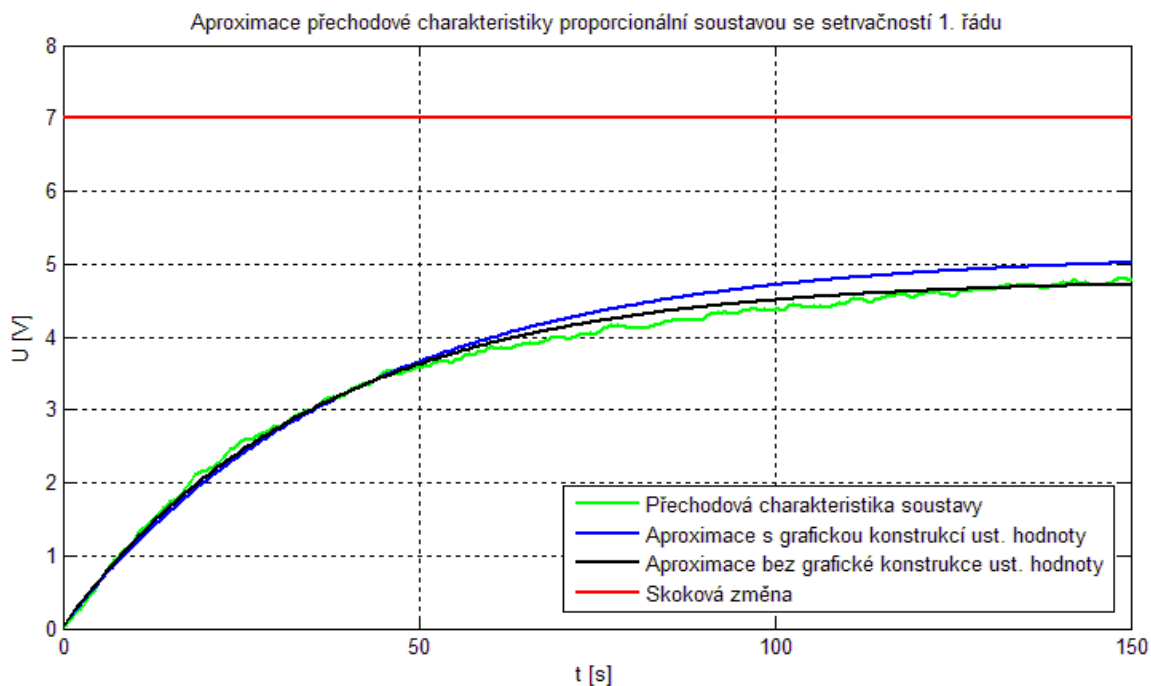
Určení setrvačné časové konstanty T_I

$$y_{0,63}^* = 0,63 \cdot y_{\infty} + y_0^* = 3,2682 \text{ V}. \quad (47)$$

$$t_{0,63}^* = 40,35 \text{ s} \rightarrow T_I = 40,35 \text{ s}. \quad (48)$$

Po dosazení dostáváme výsledný přenos soustavy

$$G_s(s) = \frac{0,73}{40,35s + 1} \quad (49)$$



Obr. 99 Srovnání aproximací soustavy s grafickou a bez grafické konstrukce ustálené hodnoty soustavy – termistor T3

12.7.4 Identifikace pro výstup č. 4 – vrtulkový průtokoměr

Při identifikaci výstupu č. 4 byla použita skoková změna napětí na hlavním ventilátoru o velikosti 7 V. Náhradní přenos systému byl získán aproximací pomocí dvou bodů odezvy – přenosem 1. řádu s dopravním zpožděním. Pro srovnání přesnosti náhradního přenosu se skutečným systémem byla také provedena aproximace přenosem druhého řádu s dopravním zpožděním, nicméně vyšší přesnosti bylo dosaženo přenosem 1. řádu.

Ustálené hodnoty vstupní veličiny, výstupní veličiny a počáteční podmínka (stav)

$$u_{\infty} = 7 \text{ V}, y_{\infty}^* = 8,05 \text{ V}, y_0^* = 0,26 \text{ V}$$

Výpočet ustálené hodnoty výstupní veličiny

$$y_{\infty} = y_{\infty}^* - y_0^* = 8,05 - 0,26 = 7,79 \text{ V}. \quad (50)$$

Zesílení K

$$K = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{7,79}{7} = 1,11. \quad (51)$$

Určení 33% a 70% z ustálené hodnoty přechodové charakteristiky

$$y_{0,33}^* = 0,33 \cdot y_\infty + y_0^* = 2,5707 + 0,26 = 2,8307 V \rightarrow t_{0,33}^* = 3,75 s. \quad (52)$$

$$y_{0,7}^* = 0,7 \cdot y_\infty + y_0^* = 5,453 + 0,26 = 5,713 V \rightarrow t_{0,7}^* = 7,08 s. \quad (53)$$

Výpočet časové konstanty výsledného přenosu

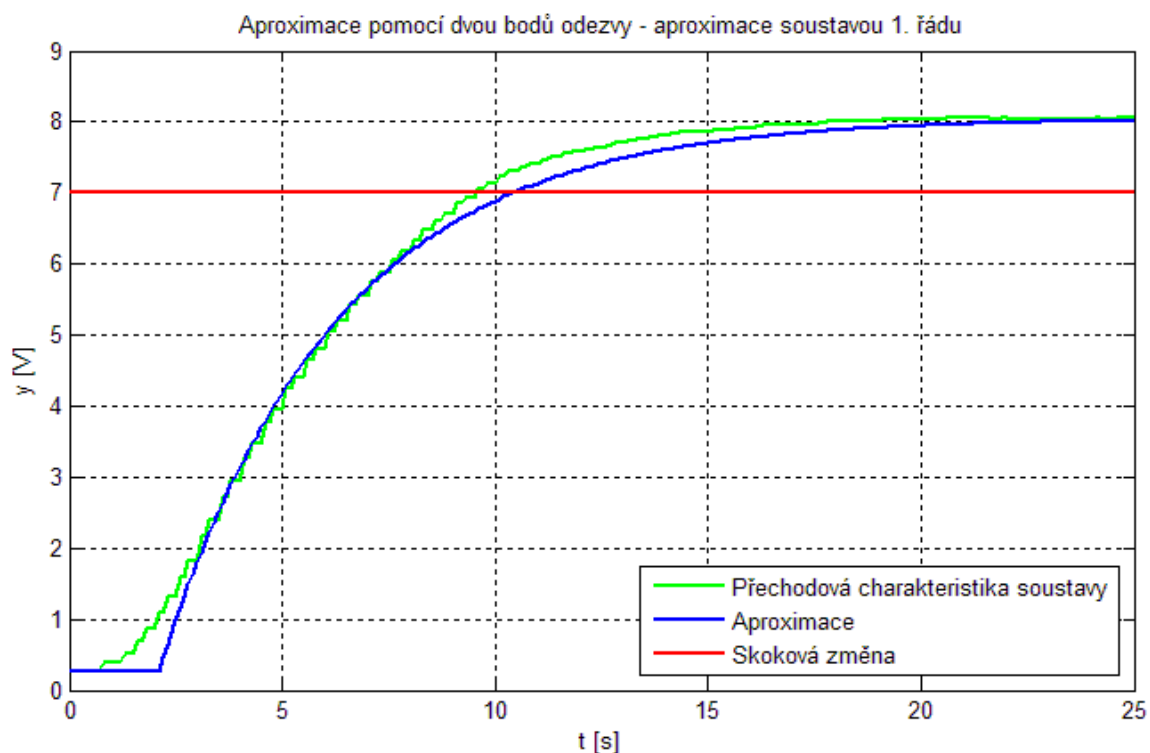
$$T_1 = 1,245(t_{0,7} - t_{0,33}) = 4,15 s. \quad (54)$$

Výpočet dopravního zpoždění

$$T_d = 1,498t_{0,33} - 0,498t_{0,7} = 2,09 s. \quad (55)$$

Po dosazení dostáváme výsledný přenos soustavy

$$G_s(s) = \frac{1,11}{4,15s + 1} e^{-2,09s}. \quad (56)$$



Obr. 100 Aproximace přechodové charakteristiky pomocí dvou bodů odezvy – aproximace přenosem 1. řádu s dopravním zpožděním

12.8 Syntéza regulačního obvodu s teplovzdušným modelem

Pro získané náhradní přenosy je potřeba navrhnout vhodný typ regulátoru. Proporcionálně-integračně-derivační (PID) regulátory jsou bezkonkurenčně nejpoužívanějšími regulátory v průmyslu. V různých literaturách i ze samotné praxe je uváděno, že velká většina z nich využívá pouze proporcionální a integrační složku. To je samozřejmě dáno i samotným typem regulované soustavy. V našem případě se jedná o tepelnou soustavu, proto bude požadována regulace bez překmitu, tedy $\kappa = 0$ a syntéza regulačního obvodu, návrh parametrů regulátoru bude proveden metodou požadovaného modelu. Syntéza je aplikována pro každý náhradní přenos samostatně. Metoda požadovaného modelu a její princip, viz [Vítečková 1998].

12.8.1 Syntéza a výsledky regulačních procesů pro PS regulátor

Vývojový diagram algoritmu pro výpočet akčního zásahu PS regulátoru je uveden v kapitole 12.4.1. V této kapitole se zaměříme na samotné výsledky syntézy a regulačního procesu pro dané typy soustav.

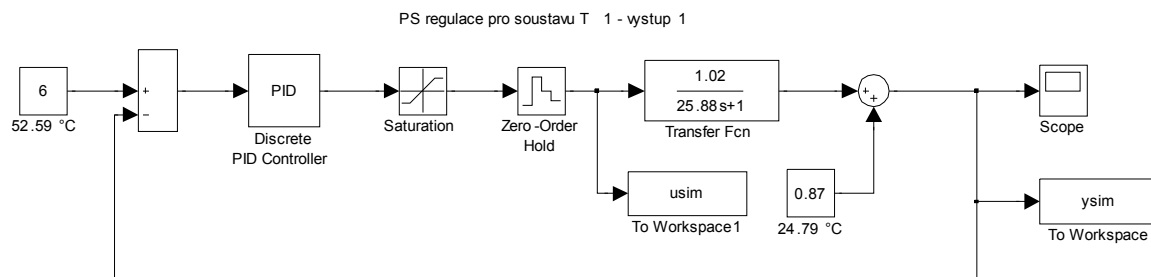
Syntéza regulačního obvodu pro soustavu termistor T1 – NR 354 20 KU na baňce žárovky:

Pro přenos získaný v kapitole 12.7.1 (s grafickou konstrukcí ustálené hodnoty) navrhne regulátor metodou požadovaného modelu. Časovou konstantu T_w volíme pro soustavu bez dopravního zpoždění s ohledem na omezení akční veličiny a maximální hodnotu zesílení na $T_w = 20 \text{ s}$. Protože se jedná o číslicový regulátor, vzorkovací periodu volíme podle vztahu $T < 0,3T_w$, tedy $T = 0,5 \text{ s}$.

- Přenosu $G_s(s) = \frac{1,02}{25,88s + 1}$ odpovídá diskretní PS regulátor.
- Výpočet provádíme pro vzorkovací periodu $T = 0,5 \text{ s}$ a požadujeme regulaci bez překmitu $\kappa = 0$.
- Vypočteme stavitelné parametry regulátoru k_p^* a T_I^* , tedy

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 25,63 \text{ s}, k_p^* = \frac{2T_I^*}{k(2T_w + T)} = 1,24. \quad (57)$$

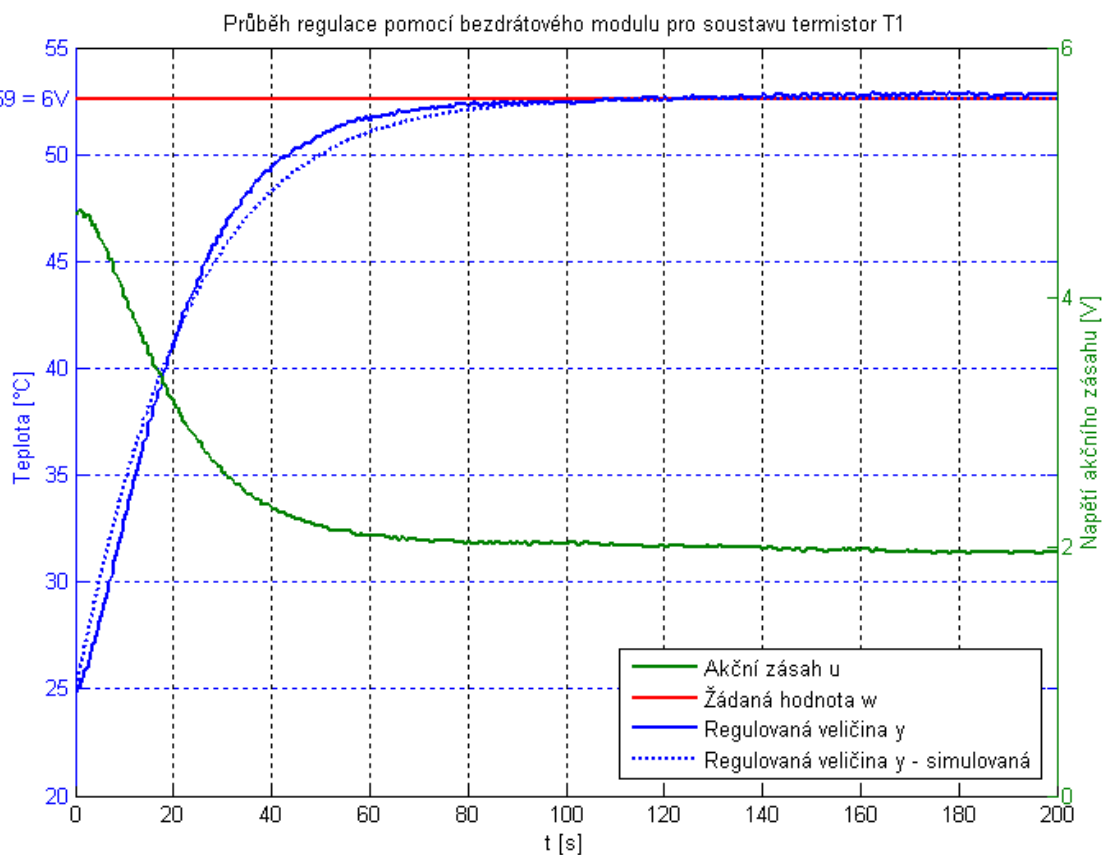
Na obr. 102 můžeme vidět průběh reálné regulace pomocí bezdrátového modulu, který je přímo napojen na teplovzdušný model s porovnáním simulovaných výsledků regulace. Simulační schéma regulačního obvodu s PS regulátorem můžeme vidět na obr. 101.



Obr. 101 Simulační schéma regulačního obvodu s PS regulátorem

Parametry pro nastavení regulátoru jsou bezdrátově odesílány z koordinátoru sítě, který je připojen k PC, přes aplikaci *Jenie Net*.

Protože se jedná o tepelnou soustavu a bohužel použitý model nedisponuje přímým výstupem z elektronické jednotky ve stupních Celsia, ale pouze výstupem ve voltech, musela být pro převod na stupně Celsia změřena statická charakteristika, která je pro každou soustavu termistoru uvedena v příloze III. Z rovnice regrese je možné provést příslušný přepočet.



Obr. 102 Průběh reálné a simulované regulace pro soustavu T1

Při reálné regulaci na obr. 102 je požadována teplota na baňce žárovky, která je snímána termistorem T1 52,59 °C, což odpovídá dle statické charakteristiky napětí 6 V na výstupu elektronické jednotky. Akční zásah zde představuje velikost napětí dodávaného na žárovku.

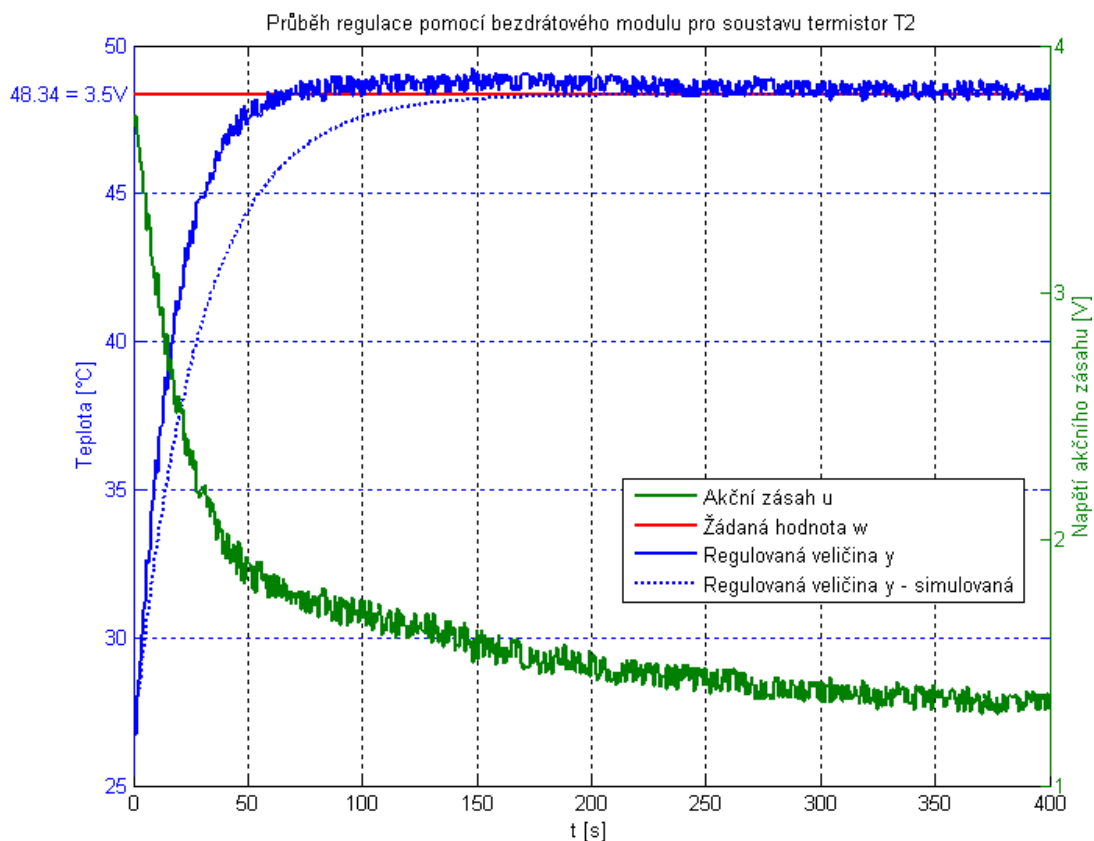
Syntéza regulačního obvodu pro soustavu termistor T2 – NR 354 20 KU 5mm od baňky žárovky:

Časovou konstantu T_w volíme pro soustavu bez dopravního zpoždění, $T_w = 30$. Vzorkovací periodu volíme podle vztahu $T < 0,3T_w$, tedy $T = 0,5$ s.

- Přenosu $G_S(s) = \frac{0,60}{31,62s + 1}$ odpovídá diskretní PS regulátor.
- Výpočet provádíme pro vzorkovací periodu $T = 0,5$ s a požadujeme regulaci bez překmitu $\kappa = 0$.
- Vypočteme stavitelné parametry regulátoru k_p^* a T_I^* , tedy

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 31,37 \text{ s}, \quad k_p^* = \frac{2T_I^*}{k(2T_w + T)} = 1,73. \quad (58)$$

Na obr. 103 můžeme vidět srovnání regulace reálné soustavy a získaných simulačních výsledků. Z průběhu je patrné, že regulovaná veličina, tedy výstup ze soustavy (elektronické jednotky) jako vstup příslušného A/D převodníku (A/D2) je zatížen šumem, se kterým se musí regulátor vypořádat. Tento nedostatek lze odstranit filtrací výstupu ze soustavy např. použitím vhodné velikosti odporu a kapacity kondenzátoru jako RC členu, popř. možností průměrováním hodnot z A/D kanálu.



Obr. 103 Průběh reálné a simulované regulace pro soustavu T2

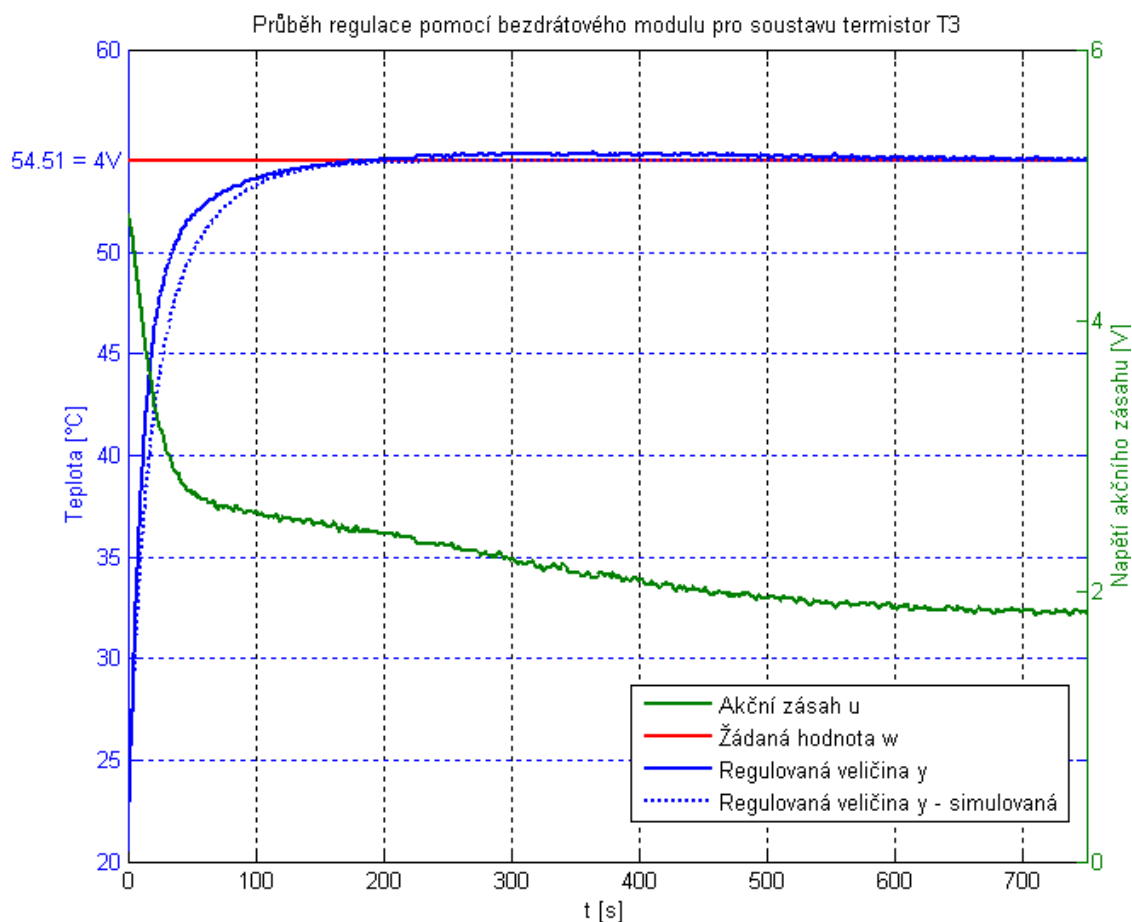
Syntéza regulačního obvodu pro soustavu termistor T3 – KTY 81 210 na baňce žárovky:

Časovou konstantu T_w volíme pro soustavu bez dopravního zpoždění, $T_w = 40$. Vzorkovací periodu volíme podle vztahu $T < 0,3T_w$, tedy opět $T = 0,5$ s.

- Přenosu $G_S(s) = \frac{0,73}{40,35s + 1}$ odpovídá diskretní PS regulátor.
- Výpočet provádíme pro vzorkovací periodu $T = 0,5$ s a požadujeme regulaci bez překmitu $\kappa = 0$.
- Vypočteme stavitelné parametry regulátoru k_p^* a T_I^* , tedy

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 40,10 \text{ s}, \quad k_p^* = \frac{2T_I^*}{k(2T_w + T)} = 1,36. \quad (59)$$

Na obr. 104 můžeme vidět srovnání regulace reálné soustavy a získaných simulačních výsledků.



Obr. 104 Průběh reálné a simulované regulace pro soustavu T3

Z výsledků reálné regulace pro všechny tři soustavy termistorů teplovzdušného modelu je možné konstatovat, že průběh reálné a simulované regulované veličiny se liší.

Za příčinu lze uvažovat nepřesnost při identifikaci a tedy nedokonalost získaného náhradního přenosu.

Syntéza regulačního obvodu pro soustavu vrtulkový průtokoměr:

Pro přenos soustavy získaný v kapitole 12.7.4 navrhne parametry číslicového regulátoru pomocí metody požadovaného modelu, kde opět požadujeme regulaci bez překmitu $\kappa = 0$. Protože se jedná o soustavu s dopravním zpožděním, budeme pro výpočet zesílení regulátoru potřebovat zesílení otevřeného regulačního obvodu a . Vzorkovací periodu volíme podle vztahu $T < 0,32T_d$, tedy volíme $T = 0,1\text{ s}$.

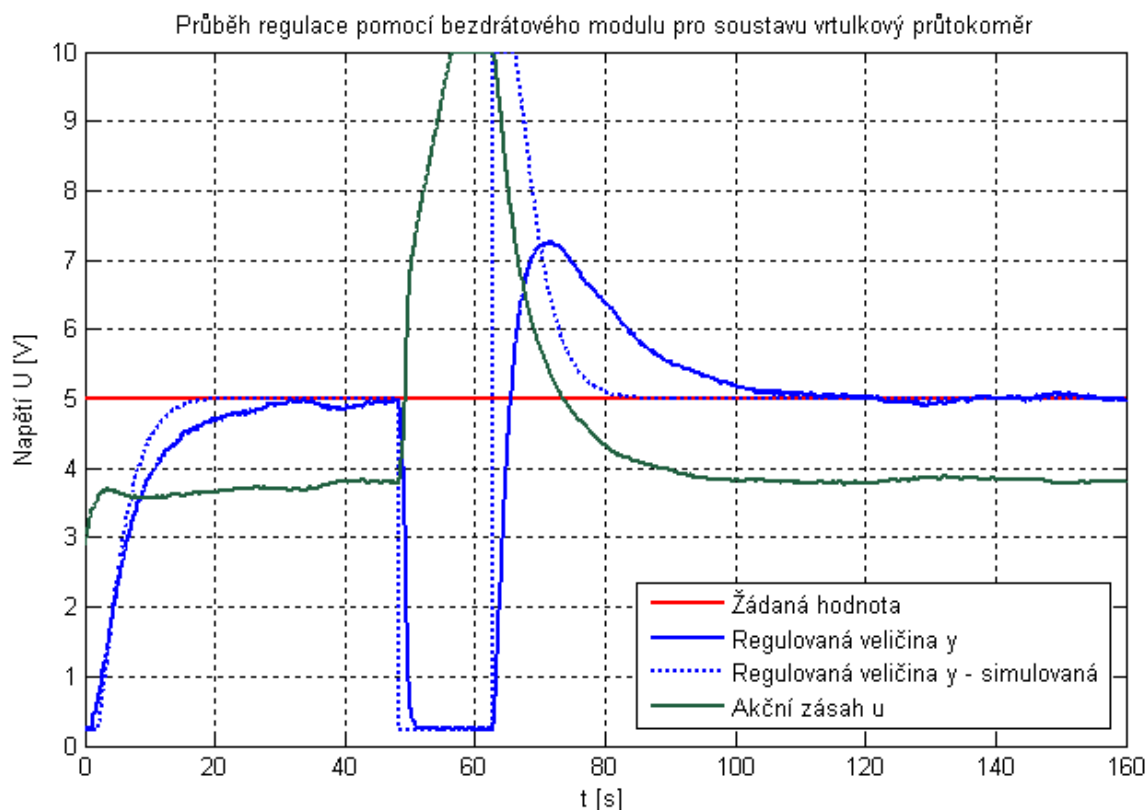
- Přenosu $G_s(s) = \frac{1,11}{4,15s + 1} e^{-2,09s}$ odpovídá diskrétní PS regulátor.
- Výpočet provádíme pro vzorkovací periodu $T = 0,1\text{ s}$ a požadujeme regulaci bez překmitu $\kappa = 0$.
- Vypočteme zesílení otevřeného regulačního obvodu a , kde koeficienty $\alpha = 1,282$ a $\beta = 2,718$.

$$a = \frac{1}{\alpha T + \beta T_d} = 0,17. \quad (60)$$

- Vypočteme stavitelné parametry regulátoru k_p^* a T_I^* , tedy

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 4,10\text{ s}, \quad k_p^* = \frac{aT_I^*}{k} = 0,63. \quad (61)$$

Na obr. 105 můžeme vidět srovnání regulace reálné soustavy a získaných simulačních výsledků s testem správné funkčnosti naprogramovaného anti wind-up efektu. Tedy odstranění růstu výstupní veličiny regulátoru, tj. zastavení načítání (integrace) u členu, který realizuje sumační (integrační) složku regulátoru. Toto algoritmické omezení bylo programováno pro všechny soustavy teplovzdušného modelu.



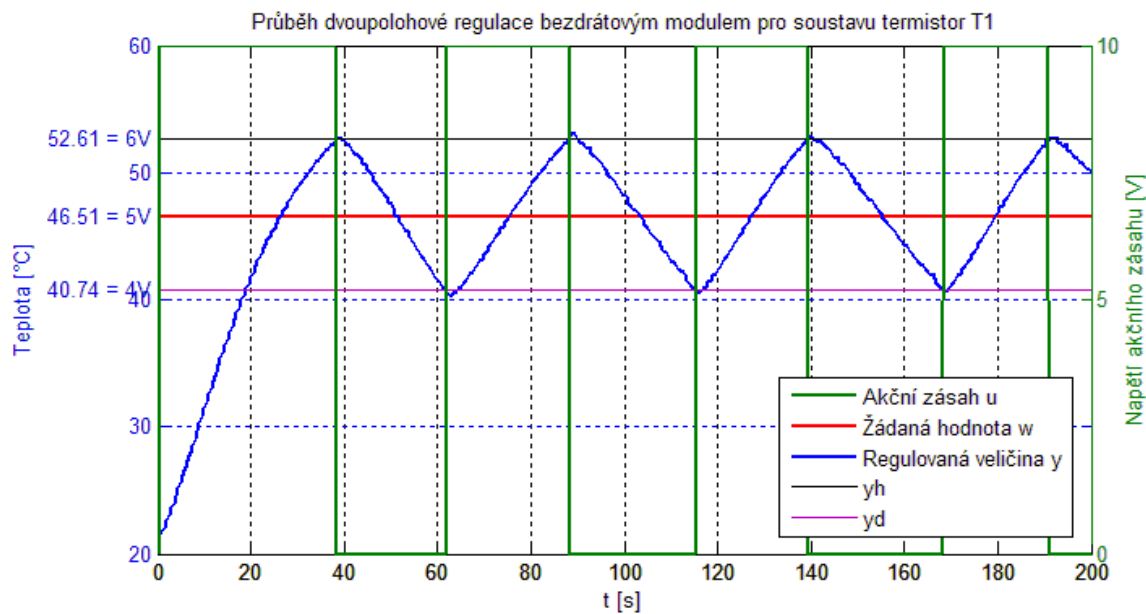
Obr. 105 Průběh reálné a simulované regulace pro soustavu vrtulkový průtokoměr s ukázkou odstranění wind-up efektu

V čase 48,3 s je realizována porucha na vrtulkový průtokoměr. Z grafu je patrné, že došlo k úplnému zastavení otáček vrtulkového průtokoměru a regulátor se snaží tento úbytek kompenzovat zvětšením akčního zásahu (velikostí napětí na hlavní ventilátor) až do maximálního omezení 10 V. Pokud by zde nebylo algoritmické omezení růstu výstupní veličiny PSD regulátoru, docházelo by k neustálé integraci akčního zásahu. V čase 62,6 s můžeme sledovat odeznění poruchy a regulátor vlivem programovaného anti wind-up efektu okamžitě snižuje velikost akčního zásahu, ovšem vlivem nastavené maximální akční veličiny regulátorem, dojde při regulaci na žádanou hodnotu k překmitu.

12.8.2 Výsledky regulačního procesu pro dvoupolohový regulátor

Aplikace *Jenie Net*. nabízí při volbě senzorové sítě *Jenie* možnost dvoupolohové regulace pro teplovzdušný model. Tento typ regulace je opět možné vybrat pro všechny typy soustav (termistor T1 až T3 i vrtulkový průtokoměr). Vývojový diagram dvoupolohového regulátoru byl popsán v kapitole 12.5. V aplikaci je možné volit číslo výstupního kanálu, tedy typ soustavy, žádanou hodnotu, vzorkovací periodu a velikost hystereze. Akční zásah je omezen na hodnotu zapnuto odpovídající velikosti napětí 10 V podle typu soustavy v nastavení pro akční člen žárovku, popřípadě hlavní ventilátor. Úrovní vypnuto odpovídá velikosti napětí 0 V. Dvoupolohová regulace byla testována pro všechny typy soustav, v této kapitole si ukážeme výsledky dvoupolohové regulace pouze pro dvě zcela odlišné soustavy a to termistor T1 a vrtulkový průtokoměr. Pro přepočet

žádané hodnoty, regulované veličiny a hystereze z velikosti napětí ve voltech V na stupně Celsia $^{\circ}\text{C}$ pro soustavu termistor T1, vycházíme ze statické charakteristiky pro termistor T1. Musíme ovšem dbát na pracovní oblast, ze které provádíme přepočet. Tento fakt bere v úvahu i vytvořená aplikace *Jenie Net*. Výsledek dvoupolohové regulace pro soustavu termistor T1 při vzorkovací periodě 0,5 s můžeme vidět na obr. 106. Žádaná hodnota je nastavena na 5 V, což odpovídá teplotě $46,51^{\circ}\text{C}$ a požadovaná hodnota hystereze je 2 V, odpovídající teplotě v daném rozsahu $11,86^{\circ}\text{C}$.



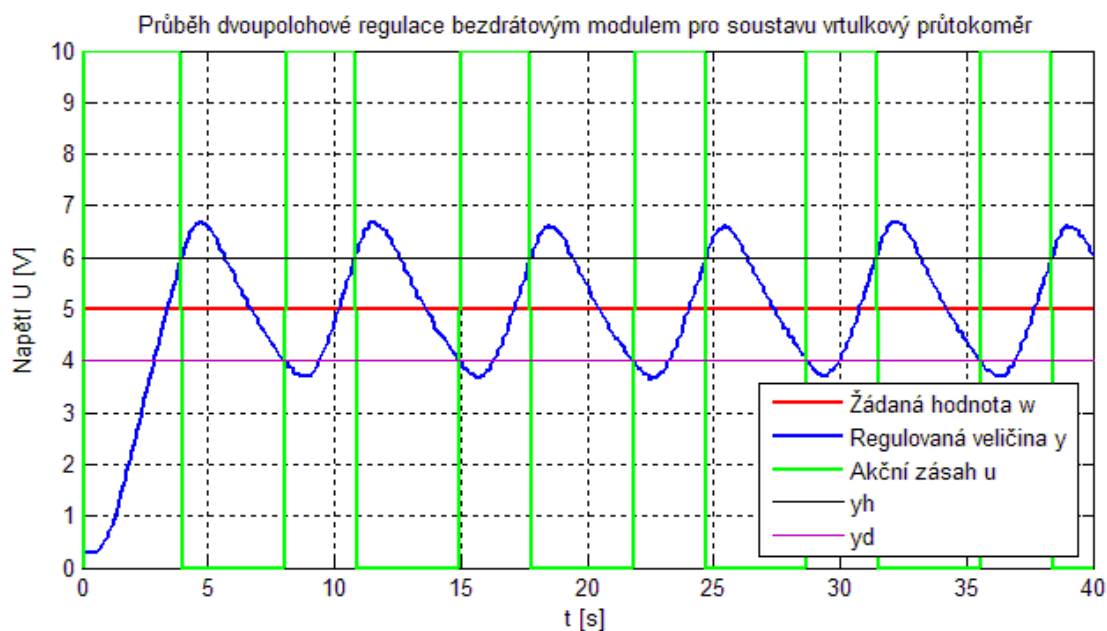
Obr. 106 Dvouhodnotová regulace pro soustavu T1

Na obr. 107 je uveden průběh dvoupolohové regulace pro soustavu vrtulkového průtokoměru při použité vzorkovací periodě 0,1 s. Žádaná hodnota je nastavena na 5 V a hodnota hystereze je velikosti 2 V. Při porovnání regulačního procesu pro soustavu termistor T1 a vrtulkový průtokoměr je vidět větší dynamika systému vrtulkového průtokoměru, čemuž odpovídá i větší překmit přesahující požadovanou hysterezi.

Je zřejmé, že při zapnutí nebo vypnutí akční veličiny nekolísá regulovaná veličina pouze v pásmu, které je dáno hysterezí regulátoru, ale toto kmitání je podstatně větší. Tedy regulovaná veličina se okamžitě nezmenšuje pokud dosáhne hodnoty y_h . Veličina po určitou dobu ještě narůstá. Je to způsobeno setrvačností v soustavě, které je dáno velikostí doby průtahu T_u (dopravního zpoždění T_d). Po uplynutí této doby začne regulovaná veličina klesat a při dosažení hodnoty y_d dojde k zapnutí akčního zásahu. Regulovaná veličina se ale vlivem setrvačnosti soustavy nadále zmenšuje. To je také způsobeno velkou hodnotou hystereze. Na kvalitu regulačního pochodu má v tomto případě vliv samotná regulovaná soustava a velikost hystereze.

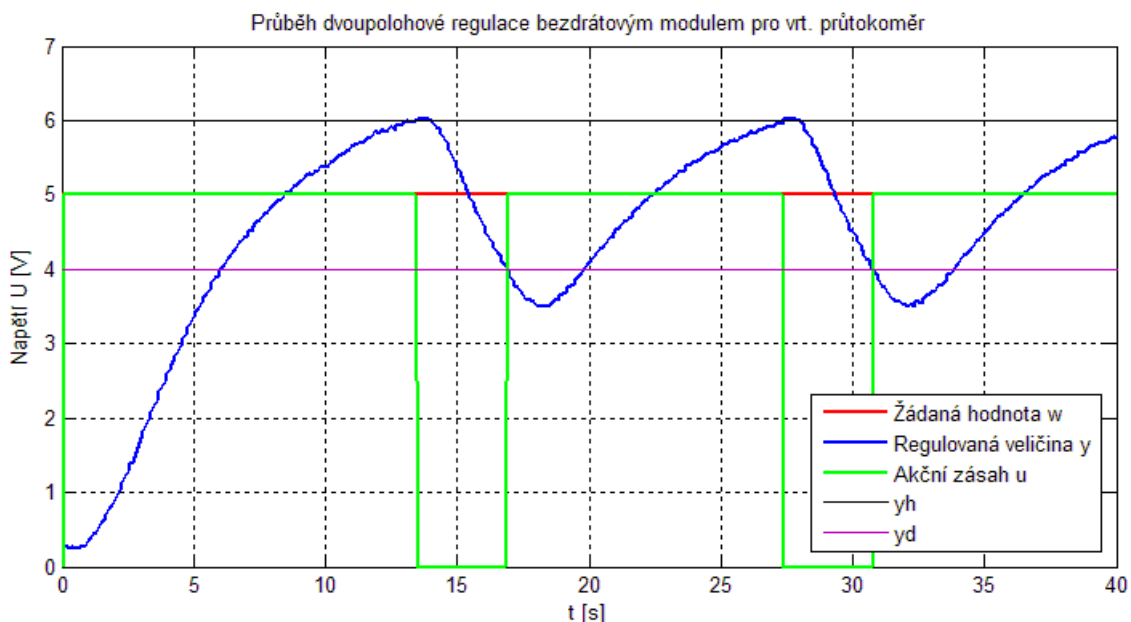
Aplikace *Jenie Net* má programově omezenou velikost hystereze, kterou může uživatel zadávat. Tato hodnota je minimálně 0,5 V, které odpovídá přepočtená velikost na stupně Celsia pro soustavy termistorů. Účelem omezení je znemožnit uživateli zadat nižší hodnotu hystereze, která by mohla vlivem vysoké frekvence spínání akčního členu

(hlavního ventilátoru nebo žárovky) způsobit poškození vedoucí např. k přepálení vlákna žárovky, poškození D/A výstupu bezdrátového modulu apod.



Obr. 107 Dvuhodnotová regulace pro soustavu vrtulkový průtokoměr při velikosti akčního zásahu 0 - 10 V

Regulační odchylku lze snížit zmenšením hystereze, což vede k již zmiňovanému častějšímu spínání výkonových členů s negativním dopadem na jejich životnost. Na obr. 108 můžeme vidět dvoupolohovou regulaci se stejnou hysterezí ovšem s programově zmenšenou hodnotou akčního zásahu na hlavní ventilátor o velikosti 0 až 5 V.



Obr. 108 Dvuhodnotová regulace pro soustavu vrtulkový průtokoměr při velikosti akčního zásahu 0 - 5 V

Zde můžeme pozorovat vlivem omezení výkonu akčního členu na polovinu pomalý náběh na horní mez y_h a větší podkmit pod dolní mez y_d . Tedy změnou velikosti akčního zásahu na přípustnou mez (aby byla dosažena horní hranice pásma hystereze a zajištěna tak regulace v pásmu hystereze) lze získat na úkor delší doby náběhu relativně nulový překmit nad hodnotu y_h , ale podstatně větší podkmit pod dolní hranici hystereze y_d . Akční zásah nemusí být v tomto rozsahu dostatečný pro jinou volbu žádané hodnoty.

Na základě testů při regulaci soustav jsme měřením doby výpočtu regulátoru (akčního zásahu) společně s nastavením D/A výstupů a komplexního procházení algoritmu zjistili kritickou mez nastavitelnou jako frekvenci vzorkování. Ta nesmí přesahovat hodnotu 30 Hz, i když jsme se snažili o optimalizaci kódu. Tato „nizká“ hodnota je ovlivněna souběžným rádiovým vysíláním, složitostí a programovým kódem psaným v jazyce C. Ten je sice velmi pohodlný při programování mikroprocesorů, nicméně uživatel si mnohokrát neuvědomuje zpomalení výpočtu. Zrychlení lze dosáhnout při programování např. v jazyku Assembler, ale bohužel programový kód by byl velmi nepřehledný a z hlediska náročnosti vytvářených aplikací také nerealizovatelný.

Bezdrátové řízení jako takové se jeví jako velmi problematické a při řešení jsme narazili na několik téměř neřešitelných problémů, které v konečné fázi vedly na aplikaci programu regulátoru do modulu, který se stal nakonec součástí technologického procesu.

Z výše uvedených výsledků můžeme bezdrátové moduly JN5139 a potažmo technologii IEEE 802.15.4 doporučit vedle senzorových plošně distribuovaných sítí také do oblasti řízení technologických procesů. Musíme mít ale na paměti, že regulace procesu probíhala přes přímé vodičové spojení bezdrátového modulu s procesem. Bezdrátově modul odesílal data z procesu a přijímal nastavení pro regulátor a regulační proces. Tímto způsobem můžeme ovládat a přijímat data z několika procesů souběžně. Přitom zpoždění přenosu dat do vizualizační aplikace nemá vliv na regulaci procesu.

13 Spojení senzorové sítě a sítě pro řízení technologického procesu

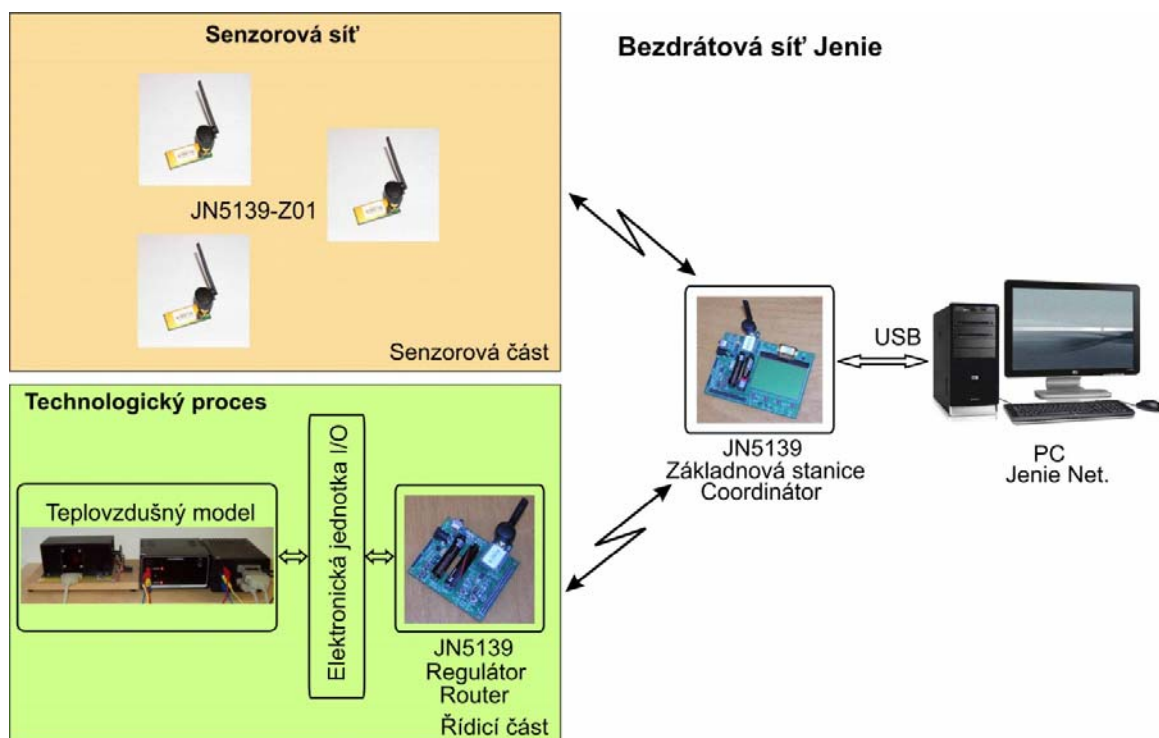
Obě části řešení, senzorová síť i řídicí část využívají společnou základnovou stanici (koordinátora sítě), zakládající celou síť. Tato stanice vyhodnocuje data ze senzorové sítě i z technologického procesu. Podle příchozích dat, jejich velikosti payload, stejně jako tomu bylo v případě směrovače obsahující algoritmy regulátorů, viz obr. 88, testuje koordinátor jejich hodnotu na 6 a 22 Byte. V programu samotného koordinátoru vypadá zápis následovně:

```
PUBLIC void vSensor_Remote(uint64 u64Address, uint16 u16Length, uint8 *pu8Data)
{
    tsSensorReading sRemoteReading;
    tsSensorReadingEndTVMMModule sRemoteReadingEndTVMMModule;
    /* Have we got 6 bytes of data ? */
    if (u16Length == 6)
    {
        /* Unformat the data */
        vSensor_Unformat(&sRemoteReading, pu8Data);
        /* Print the data - will only work if the UART was opened */
        vSensor_Print(u64Address, &sRemoteReading);
    }
    /* Have we got 22 bytes of data ? */
    if (u16Length == 22)
    {
        /* Unformat the data */
        vSensor_Unformat2(&sRemoteReadingEndTVMMModule, pu8Data);
        /* Print the data - will only work if the UART was opened */
        vSensor_Print2(u64Address, sRemoteReadingEndTVMMModule);
    }
}
```

Funkce *vSensor_Remote(uint64 u64Address, uint16 u16Length, uint8 *pu8Data)* je volána z funkce *vNetwork_Rx(uint64 u64Address, uint16 u16Length, uint8 *pu8Data)*, která je součástí funkce *vJenie_CbStackDataEvent (teEventType eEventType, void *pvEventPrim)*. Tato funkce je volána protokolem stack, aby informovala aplikaci, že nastala jedna nebo více datových událostí jako je příjem dat z bezdrátové sítě. Funkci lze označit jako „Stack to Application“ funkci s parametry datové události a pointerem do datové struktury obsahující informaci o základních událostech. Všechny

tyto programované funkce jsou obsahově rozsáhlé, proto uvádíme pouze jejich globální činnost.

Po přijetí dat o velikosti 6 Byte dojde k jejich dekódování a uložení do struktury pro další zpracování. Jedná se o data ze sensorové sítě *Jenie*, kde obsah dat představuje informace o velikosti napětí napájecích akumulátorů, měřenou teplotu a relativní vlhkost. Identifikace jednotlivých modulů v síti je pomocí MAC adresy, která je jedním z parametrů funkce *vNetwork_Rx(uint64 u64Address, uint16 u16Length, uint8 *pu8Data)*. Data přijatá z technologického procesu mají velikost 22 Byte a identifikace modulu řídicího teplovzdušný model je stejná jako u sensorové sítě, protože tento bezdrátový modul je součástí sítě *Jenie*. Spojení obou těchto částí řešení, sensorové sítě a řídicí části můžeme vidět na obr. 109.



Obr. 109 Plošně distribuovaná sensorová síť *Jenie* ve spojení s řídicí částí

Data jsou po jejich příjmu a uložení odeslána na sériovou linku. To zajišťují funkce *vSensor_Print(u64Address, &sRemoteReading)* a *vSensor_Print2(u64Address, &sRemoteReadingEndTVModule)* s parametrem adresy modulu a odkazem na data. *Jenie Net.* aplikace při volbě sítě *Jenie* a dat ze sensorové části přijímá data z ASCII ovladače v následujícím tvaru:

0xa458aV3031T26H40E

kde:

0xa458a Představuje zkrácenou MAC adresu bezdrátového modulu, ze kterého byla data přijata

V3031 Hodnota napětí napájecích akumulátorů [mV] ~ 3,031 V.

T26 Měřená teplota [°C] ~ 26 °C.

H40 Nepřepočtená hodnota relativní vlhkosti [%] ~ 40 %.

E Ukončovací znak.

Hodnota relativní vlhkosti musí být přepočítána, aby hodnota výsledné relativní vlhkosti odpovídala rozsahu 0-100 %.

Data přicházející z technologického procesu (jako součást sítě *Jenie*) jsou ASCII ovladačem zobrazena následovně:

0xa458aV3031T26H40E2045A3050B1560C2564D1950F1850G50I

Počáteční struktura řetězce po zakončení znakem E je stejná jako pro senzorovou část, navíc jsou přenášena data z A/D a D/A převodníků. Znaky v řetězci znamenají:

E2045 Hodnota z A/D1 převodníku ~ 2045 z rozsahu (0 - 4095).

A3050 Hodnota z A/D2 převodníku ~ 3050 z rozsahu (0 - 4095).

B1560 Hodnota z A/D3 převodníku ~ 1560 z rozsahu (0 - 4095).

C2564 Hodnota z A/D4 převodníku ~ 2564 z rozsahu (0 - 4095).

D1950 Hodnota z D/A1 převodníku ~ 1950 z rozsahu (0 - 2047).

F1850 Hodnota z D/A2 převodníku ~ 1850 z rozsahu (0 - 2047).

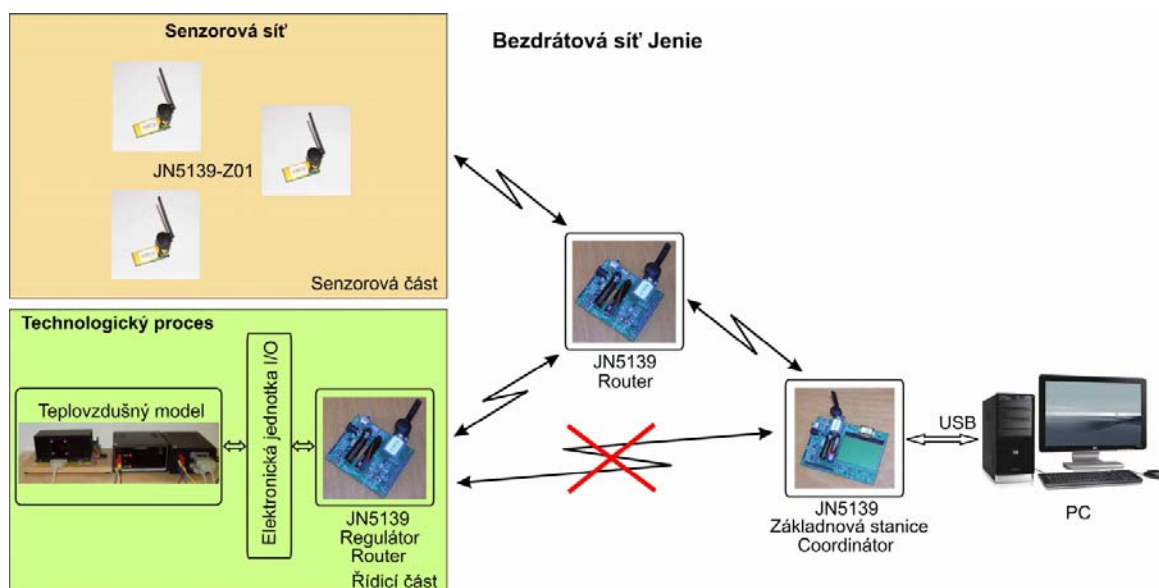
G50 Hodnota časového vzorku ~ 50 (dělena hodnotou 100), tzn. 0,5 s.

I Ukončovací znak.

Jenie Net. aplikace hodnoty z A/D a D/A převodníků přepočte na velikost odpovídajícího napětí a následně je vizualizuje a uloží.

Celá síť je navržena pro optimalizaci elektrické energie v síti. Koncové stanice (End Devices) obsahují algoritmy pro snížení jejich spotřeby. Modul řídicí technologický proces obsahuje algoritmy pro snížení spotřeby, nicméně nemůže být uveden do režimu „sleep“. Stejně je tomu i v případě směrovačů a koordinátoru, ke kterému je připojen.

Je výhodné, když je modul řídicí technologický proces přímo připojen ke koordinátoru sítě, čímž se omezí vznik latencí v komunikaci. Další stanice senzorové sítě mohou být připojeny přes libovolné směrovače. Na obr. 110 je vidět funkce směrovače, který přebírá komunikaci v případě ztráty signálu mezi základnovou stanicí a směrovačem (routerem) řídicí proces. Ten má v tomto případě zakázanou funkci směrování.



Obr. 110 Plošně distribuovaná senzorová síť *Jenie* v topologii strom – v komunikaci přes připojený směrovač

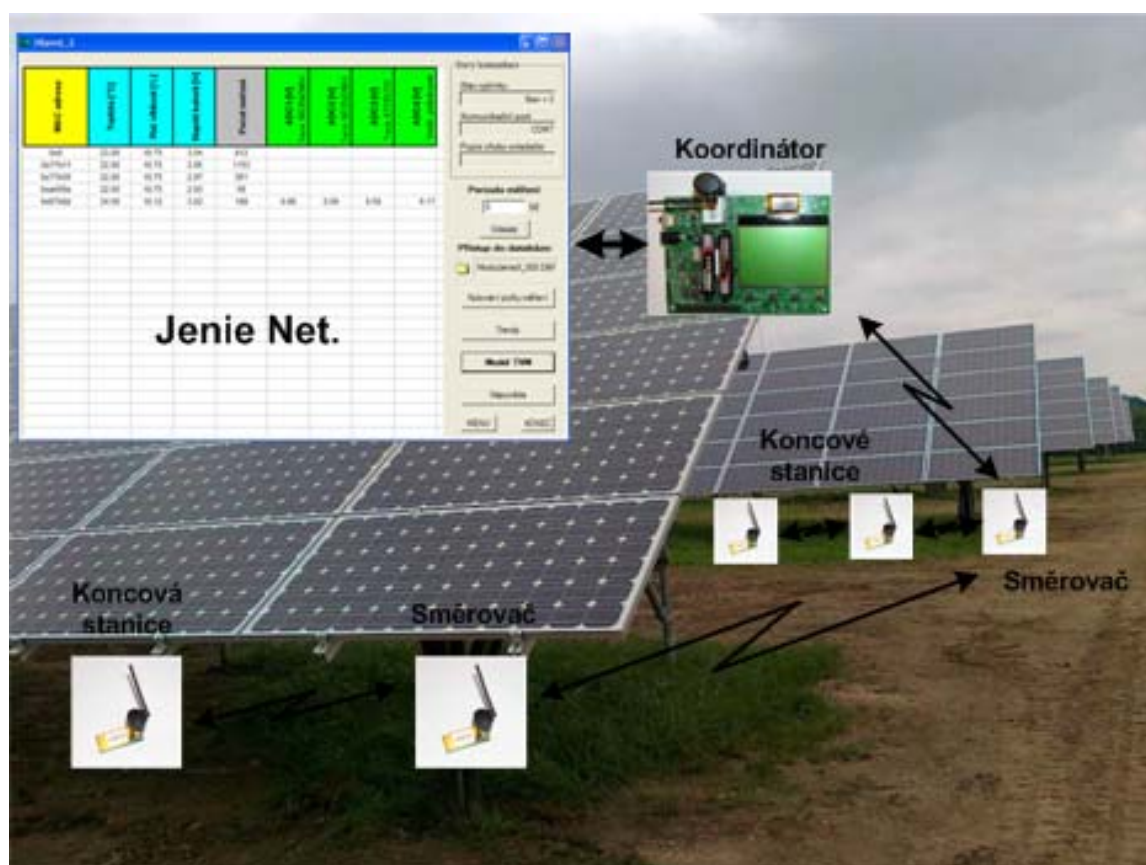
Směrovač využívá ve stromové topologii hierarchické směrování. Je to systém směrovacích informací, které jsou rozděleny do oblastí. Každá oblast tak řeší vlastní změny v topologii a směrovače propojující tyto oblasti dostávají pouze souhrnné informace. Je to typické pro rozsáhlé sítě.

14 Možnosti využití aplikace Jenie Net. a vytvořených senzorových sítí

Sledování napětí jednotlivých uzlů rozlehlých fotovoltaických elektráren

Jednou z možných aplikací je využití distribuovaných senzorových sítí pro monitorování jednotlivých uzlů fotovoltaických elektráren. Tato problematika byla nastíněna společností, která využívá solární panely jako zdroj příjmu. Hlavním zadáním byla potřeba monitorovat jednotlivé panely nebo skupinu solárních panelů a data odesílat do řídicího a centrálního místa. Odtud je obsluha schopna reagovat na problémy dodávky elektrické energie z panelů, které mohou být poškozeny.

Moduly Jennic JN5139 a použitý standard IEEE 802.15.4 je ideálním řešením. Navržená síť *Jenie* s topologií strom a vytvořená softwarová podpora *Jenie Net.* umožňuje přijímat data z bezdrátových modulů, které se stávají součástí jednotlivých uzlů solárních panelů. Na obr. 111 můžeme vidět, jak by mohlo vypadat rozložení modulů pro fotovoltaickou elektrárnu.



Obr. 111 Ukázka možnosti rozložení bezdrátových modulů a připojení k *Jenie Net.* aplikaci

Každý bezdrátový modul je napojen na určitou větev několika solárních panelů. Identifikace modulů, resp. solárních panelů je pomocí MAC adresy. Každý modul může

být napájet z akumulátoru, který je dobíjen přímo ze solárního panelu, tak jak to bylo popsáno a v konečné fázi také realizováno, viz kapitola 6.

Modul může odesílat informace do řídicího centra o stavu panelu, napětí v daném uzlu, což může být přímo přepočítáno na okamžitý dodávaný výkon uzlem. *Jenie Net.* může být také napojena na síť GSM způsoby, jaké jsou rozebírány v kapitole 16. To umožní odesílat informace o výpadku dodávky elektrické energie formou SMS správci či majiteli elektrárny přímo na mobilní telefon. Frekvence odesílání dat přitom může být velmi nízká, často stačí odeslat data jednou za 2 hodiny, kde modul je po dobu nečinnosti uveden do spánkového režimu. Moduly mohou zároveň plnit funkci zabezpečovacího systému. V případě odcizení panelů, tzn. rozpojením smyčky DIO vstupů mezi několika panely, vznikne impuls, aktivizující modul ze spánkového režimu, který odešle data o vzniklé situaci.

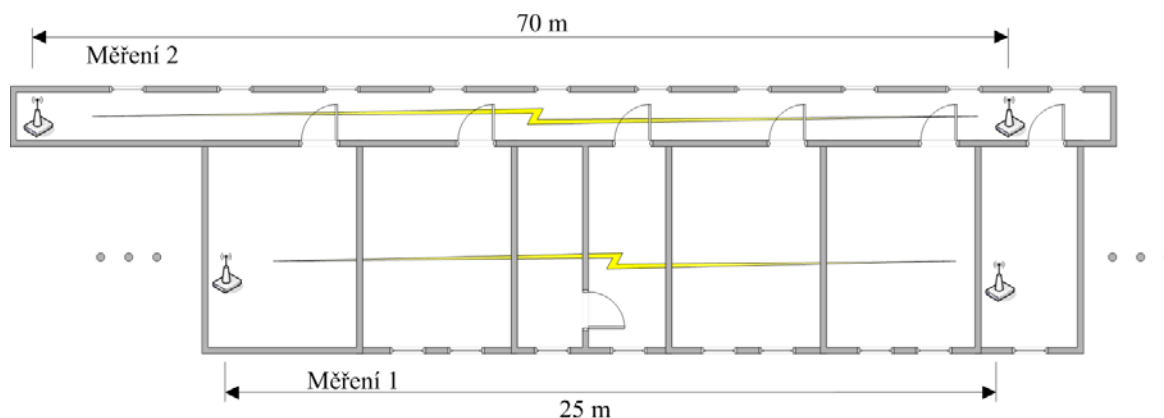
Jako další oblasti, kde se vytvořená aplikace společně s navrženými sítěmi může výhodně uplatnit, jsou:

- Meteorologická stanice – měření teploty, relativní vlhkosti, osvětlení.
- Měření kvality vod.
- Inteligentní dům – ovládání světel, regulace topení apod.
- Možnosti využití k regulaci procesů, bezdrátová identifikace soustav.
- Náhrada za RFID čtecí zařízení apod.

15 Měření dosahu bezdrátových Jennic stanic

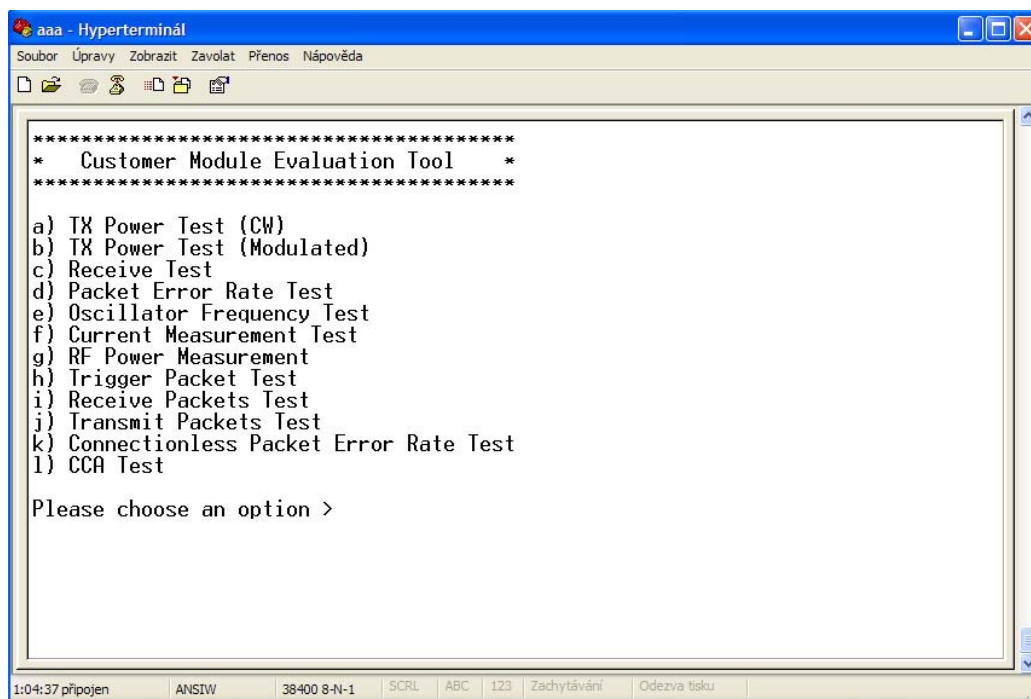
Velkým omezením pro síť standardu IEEE 802.15.4 je jejich dosah. Tato technologie sice umožňuje adresovat v síti až 65 535 zařízení, reálně to však bývá kolem stovek bezdrátových modulů. Pokud uvažujeme vzdálenost mezi dvěma bezdrátovými moduly, konkrétně mezi moduly JN5139-ZO1-M02 disponující SMA anténním konektorem a tabulkovým vysílacím výkonem, je uváděn maximální dosah kolem 4 km na volném prostranství a přímé viditelnosti. Výrobce ovšem neudává, k jakému typu použitých antén se tato hodnota vztahuje. Zde se uvažují ideální podmínky pro přenos. Z praktických zkušeností lze ale říci, že dosah zařízení je silně ovlivněn prostředím, ve kterém je bezdrátová síť provozována. Nemusí se číst jednat pouze o překážky v přenosové cestě, ale přenos může být ovlivněn i jinými stanicemi vysílající ve stejném frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Abychom mohli stanovit skutečný dosah zařízení, je nutné provést měření s danými podmínkami, pro stejný typ bezdrátových stanic, kde vzdálenost mezi stanicemi a sílu signálu uvažujeme jako proměnnou veličinu.

V našem případě je možné dosah zjistit pouze testováním na odesílání a přijímání sekvence dat (určitého množství paketů) ve stanovených podmínkách. Testování bylo provedeno na 2 modulech s označením JN5139-ZO1-M02R1 s použitými 2 dBi všesměrovými anténami v prostředí zástavby, jejíž náčrtek lze vidět na obr. 112. První měření testuje dosah bezdrátových stanic bez přímé viditelnosti, zatímco druhý test je soustředěn na testování při jejich přímé viditelnosti.



Obr. 112 Náčrtek zástavby pro testování modulů s vyznačenými vzdálenostmi pro daná měření

Moduly byly programovány binárními soubory aplikace *Module Evaluation Tool*, který je vyvinut pro účely testování modulů, jejich dosahu, síly signálu, spotřeby a chybovosti při přenosu (PER). Jako komunikační rozhraní s moduly bylo zvoleno prostředí programu Hyperterminál s přenosovou rychlostí 38400 bit/s. Testovací prostředí s možností výběru jednotlivých testů lze vidět na obr. 113.

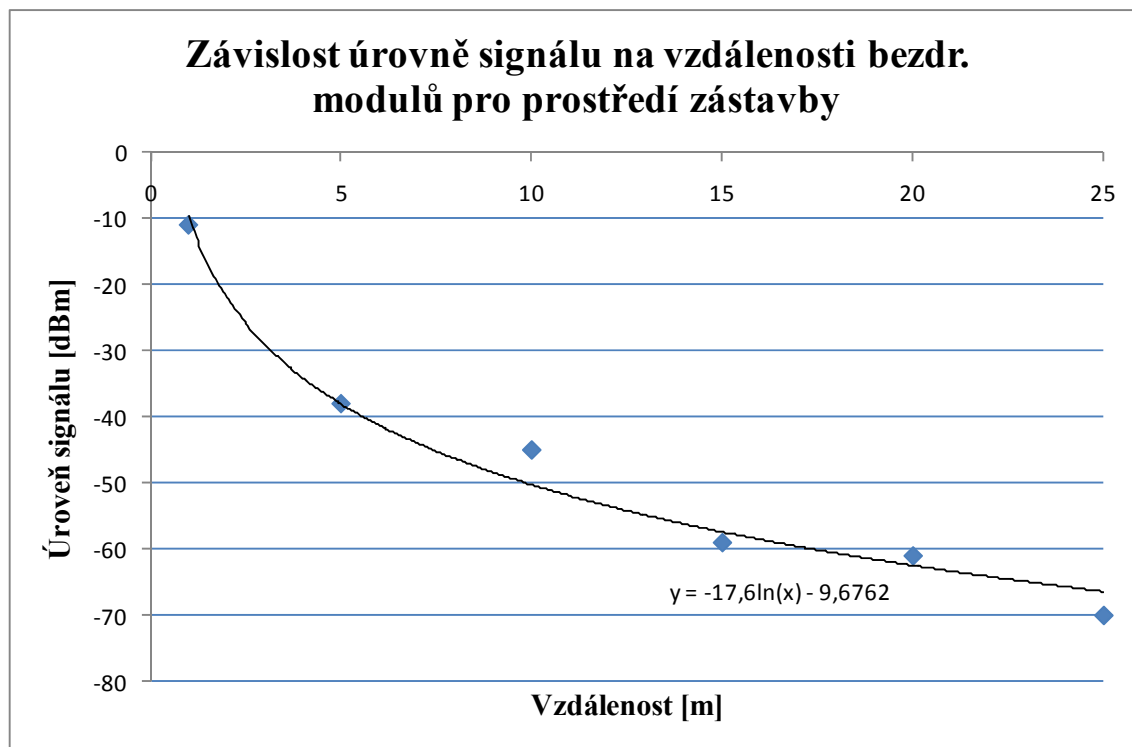


Obr. 113 Prostředí pro testování bezdrátových modulů – možnosti testování modulů

Při tomto testu lze na počátku definovat typ modulů, zda se jedná o standardní moduly s označením xxx-M00/01/03 nebo o moduly s vyšším vysílacím výkonem s označením xxx-M02/04. Po tomto výběru již vybereme samotný test s volbou pracovní frekvence mikroprocesoru. V našem případě se jedná o 16 MHz CPU.

15.1 Měření úrovně signálu na vzdálenosti modulů

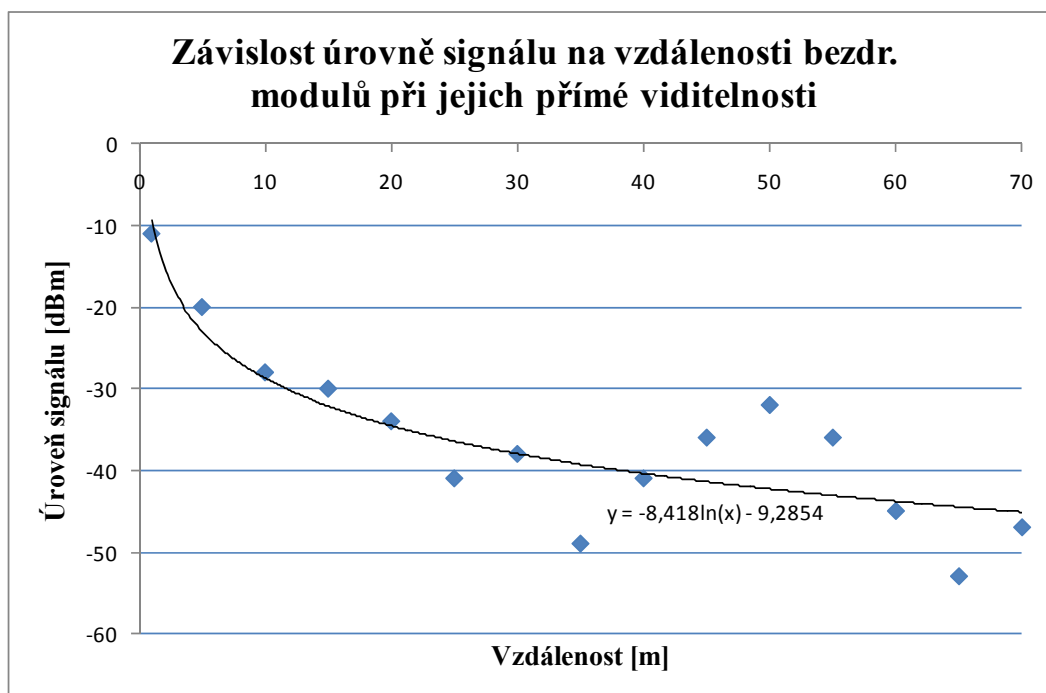
Nejdříve jsme vybrali test, kdy jedna stanice vysílá nepřetržitě signál. Přičemž střidu signálu, úroveň vysílacího výkonu a přenosovou frekvenci lze měnit. Druhá stanice signál přijímá. Oba moduly využívaly pro přenos kanál 11 a přenosovou frekvenci 2,405 GHz. Měření prostředí bylo narušeno vysíláním Access Pointu (AP), který může způsobovat ovlivňování přenosu. Jeho přenosový kanál a vysílací frekvence nebyla pro test zjišťována, protože se jedná pouze o hrubý test. Vysílací výkon modulu byl nastaven na maximum odpovídající +19 dBm. Naměřená úroveň signálu přijímací stanice se při udávané vstupní citlivosti přijímače -100 dBm pohybovala v zástavbě od -12 dBm do -70 dBm. Jedná se o závislost úrovně signálu přijímací stanice na vzdálenosti mezi dvěma bezdrátovými moduly pro měření 1 po vzdálenostech 5 m, viz obr. 114.



Obr. 114 Úroveň signálu přijímací stanice při různých vzdálenostech od vysílače
(v zástavbě – měření 1)

Z obr. 114 lze říci, že pokles úrovně signálu bezdrátové stanice přijímací data má v závislosti na vzdálenosti mezi stanicemi logaritmický charakter. Při vzdálenosti 25 m mezi moduly je útlum signálu -70 dBm. Při této vzdálenosti můžeme předpokládat vyšší chybovost v přenosu. Signál je v tomto případě šířen vznikajícími odrazy v uzavřeném prostoru od různých předmětů a jeho prostup přes stavební materiály značně ovlivňuje dosah bezdrátových stanic.

Tento test byl zopakován pro stejný krok vzdáleností mezi moduly až do 70 m, ale pro jiné přenosové podmínky - pro přímou viditelnost modulů, kde test probíhal na dlouhé chodbě (měření 2). Výsledky můžeme vidět na obr. 115. Ovšem i v tomto případě je přenosová cesta ovlivněna signály z vysílajících AP.



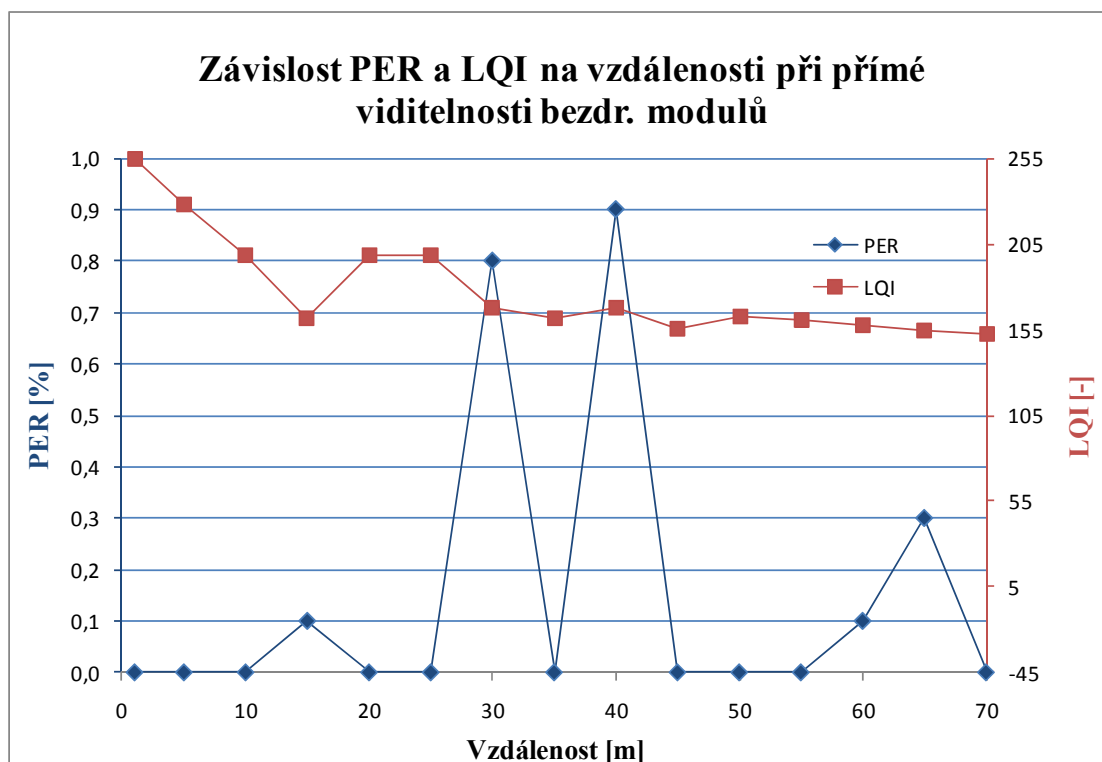
Obr. 115 Úroveň signálu přijímací stanice při různých vzdálenostech od vysílače (při přímé viditelnosti modulů – měření 2)

V tomto případě je úroveň signálu přijímací stanice vícenásobně lepší, což se dalo předpokládat. Při vzdálenosti 70 m byl naměřen pokles úrovně signálu bezdrátové stanice přijímací data -47 dBm. Zajímavé ovšem je, jak se úroveň signálu mění od vzdálenosti zhruba 30 m až do 70 m. Tento jev je možné přisoudit právě rušení z vysílajících AP, popř. odrazům signálu o okolní předměty apod. Bohužel přesnou příčinu nelze definovat, protože nemáme dostatečné vybavení pro přesné měření.

15.2 Měření PER a LQI při přenosu dat

Výše naměřené hodnoty nevypovídají nic o chybovosti při přenosu, neboli o tzv. Packet Error Rate, proto bylo provedeno další testování. Packet Error Rate (PER) vyjadřuje počet chybně přenesených datových paketů děleno počtem vyslaných paketů. Tento test byl proveden pro přenos dat mezi moduly při jejich přímé viditelnosti. Jedná se o doplňující informaci k předchozímu testu, který nám vyjádří chybovost v přenosu v závislosti na vzdálenosti. Stanice byly konfigurovány jako master a slave, kde master vysílá data a získává informace o počtu doručených a chybných paketech včetně informací o kvalitě spojení LQI (Link Quality Indicator) a chybovosti PER. Chybovost je zde vyjádřena v procentech a LQI jako bezrozměrné číslo nabývající hodnoty od 0 do 255.

Úroveň LQI vyjadřuje kvalitu linky (spojení) mezi moduly. V případě rozsáhlé sítě nám LQI umožňuje zjistit aktivní sousedy v daném uzlu a kvalitu jejich připojení. Pro každou vzdálenost bylo provedeno měření na odeslání zhruba 10 000 paketů s potvrzením jejich příjmu a přednastavenou volbou nulového opakování přenosu. Naměřený výsledek úrovně PER a LQI zde vidět na obr. 116.



Obr. 116 Vyjádření chybovosti a kvality spojení v přenosu dat v závislosti na vzdálenosti mezi moduly (při přímé viditelnosti – pro měření 2)

Chybovost v přenosu lze považovat téměř za zanedbatelnou, protože pro měřené podmínky přímé viditelnosti nedosahuje hodnoty ani 1 % při odeslaných 10 000 paketech. Nejvyšší hodnota PER je při vzdálenosti 40 m mezi moduly. Tomuto případu odpovídá ztráta či poškození 90 paketů z 10 000 při hodnotě LQI = 168 a úrovni signálu přijímací stanice -41 dBm. Veškeré výpočtové vztahy pro odhad max. vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem včetně vyjádření přijatého výkonu vztaženého k 1 mW s vyjádřením PER a LQI můžeme nalézt, viz [Capalini 2010].

Z provedených testů lze říci, že dosah bezdrátových Jennic modulů je v zástavbě pro uvedené podmínky (měření 1) výrazně nižší, odpovídající dosahu zhruba 25 m, kdy útlum signálu na přijímací straně ještě umožňuje přenos datových paketů bez výrazných ztrát. V případě přímé viditelnosti modulů (měření 2) je dosah několikanásobně větší. Z obr. 115 a obr. 116 můžeme usoudit dosah až stovky metrů pro prostředí bez rušení. V této oblasti by bylo velmi zajímavé testovat dosah modulů pro různé typy použitých antén s různým ziskem, zahrnout do měření také elektromagnetickou kompatibilitu EMC udávající schopnost správné funkce zařízení v daném elektromagnetickém okolí, aby nedocházelo k ovlivňování zařízení. S tímto souvisí měření elektromagnetického rušení EMI a elektromagnetické odolnosti EMS udávající schopnost zařízení pracovat správně v prostředí s rušením.

16 Napojení senzorové sítě na vysoce-dosahovou GSM síť

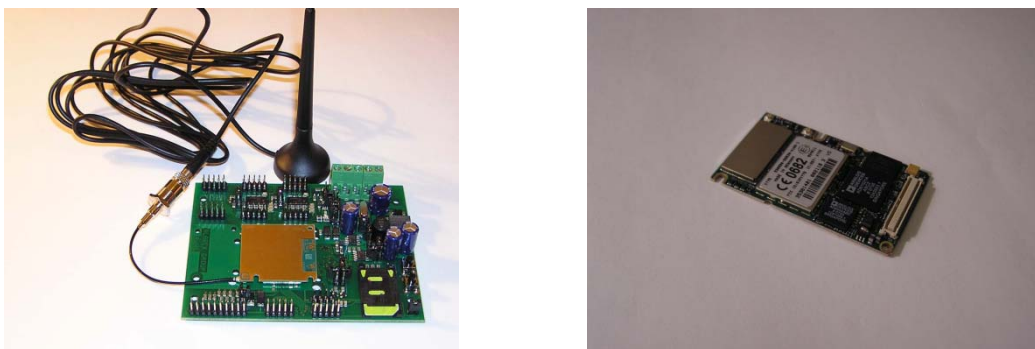
Abychom mohli data přenášet na libovolnou vzdálenost, je nutné napojit bezdrátové senzorové síť standardu IEEE 802.15.4 na vysoce-dosahové síť. Typickou sítí, která je v dnešní době „neomezená“ svým dosahem je síť GSM. Přenos dat mezi vytvořenou *Jenie* sítí a sítí GSM je poněkud nestandardní, avšak i toto řešení má své opodstatnění. GSM automaty a moduly nenabízí takový rozsah vstupů a výstupů jako moduly standardu IEEE 802.15.4, navíc měření více veličin, popř. ovládání několika zařízení najednou vyžaduje větší počet těchto GSM modulů, které jsou cenově nákladnější než samotné *Jenic* moduly.

Datový přenos v GSM sítích (např. GPRS) je zpoplatněn daným operátorem, což je jistým záporem při neustálém přenosu dat z více stanic. Při zatížení sítě také může docházet k výraznému zpoždění při přenosu či ztrátě dat. Přenos dat z každého GSM modulu nebo automatu představuje poplatek za využití GSM sítě a její služeb. Na druhou stranu jsou v dnešní době pro datové přenosy výhodné paušální tarify odvíjející se od počtu přenesených dat. Z našeho pohledu je vhodnější GSM síť využívat spíše pro nenáročné aplikace, jako zabezpečovací systémy, sledování vozidel, ovládání klimatizace, topení, pro sběr dat z plynoměrů, elektroměrů, vodoměrů, v logistice apod.

16.1 Rozbor možností spojení *Jenie* sítě se sítí GSM

Při sběru dat z více stanic je vhodnější volit lokální síť složenou z inteligentních modulů *Jenic*, které odesílají data do centrální stanice (koordinátoru sítě) a pro zajištění většího dosahu pak data předávat do nadřazené vysoce-dosahové sítě. Nabízí se několik možností jak spojit vytvořené bezdrátové senzorové síť včetně řízeného procesu s GSM sítí. Tedy vyřešit předávání dat mezi těmito sítěmi. Doteď jsou data z jednotlivých bezdrátových modulů předávána ke koordinátoru sítě a ten data posílá do vytvořené aplikace *Jenie Net*. Jako jedna z možností se nabízí využít PC jako „bránu“ pro přenos dat. Ta mohou být již jistým způsobem upravena buď přímo v *Jenie Net* aplikaci nebo v jiném prostředí. Tato disertační práce se nezabývá tvorbou brány mezi oběma bezdrátovými technologiemi, ale spíše nastiňuje dostupné hardwarové prostředky a způsob řešení takového problému.

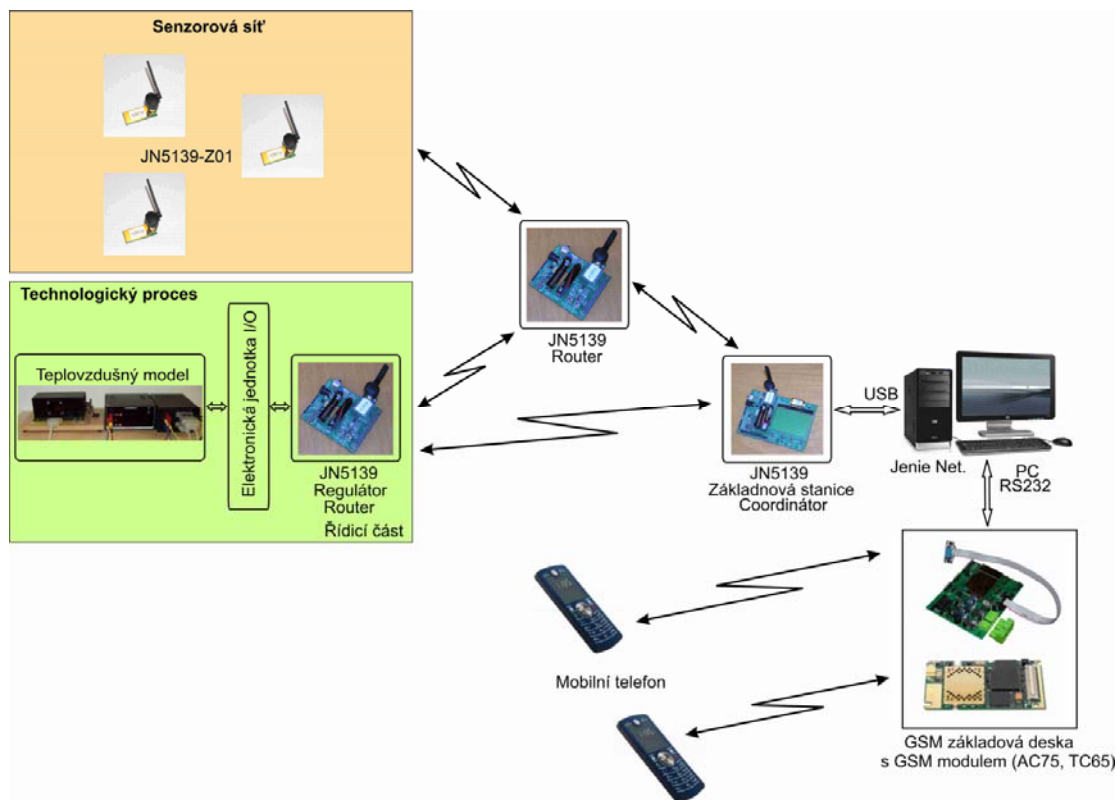
Jako hardwarové prostředky, se kterými mám jisté zkušenosti lze použít univerzální vývojovou desku od společnosti Siemens s názvem M2M Universal Motherboard 2.0 a moduly jako např. Siemens TC65, AC75 apod., viz obr. 117.



Obr. 117 Vývojová deska Universal Motherboard 2.0 a GSM modul XT 75

Moduly se liší počtem vstupů a výstupů či využívanou technologií pro přenos dat. Univerzální základová deska obsahuje množství rozhraní, jako např. digitální I/O, A/D převodníky, I2C sběrnice, RS232, USB, rozhraní pro TTL komunikaci a také konektor pro připojení SIM karty. Více o bezdrátových GSM modulech a základové desce, viz [M2MArchitect 2010]. Software pro programování těchto modulů se nazývá M2M Architekt, což je vývojové prostředí pro vývoj M2M aplikací v jazyku JAVA. Zkratka M2M znamená machine-to-machine nebo také man-to-machine či mobile-to-machine, ale globálně tento název vypovídá o komunikaci mezi lidmi, zařízeními a systémy. V mobilních komunikačních sítích se jedná o bezdrátovou komunikaci mezi jednotkami s cílem optimalizovat výrobní a ekonomické procesy.

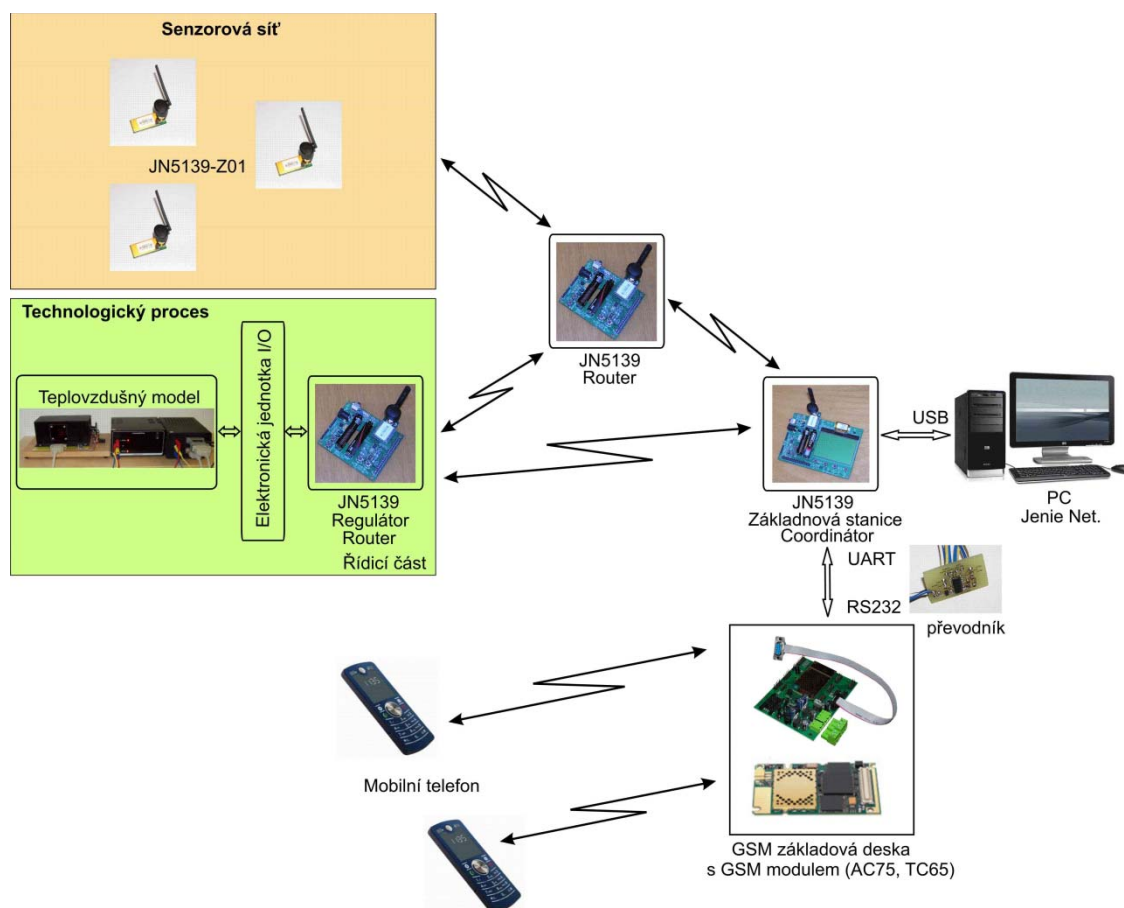
Disertační práce se dotýká GSM sítí pouze okrajově, nicméně díky architektonickému řešení prostředí M2M Architekt a podobnosti základní konstrukci jazyku JAVA s programovacím jazykem C/C++ byla vytvořena událostně řízená aplikace, tzv. event driven, která je schopna na základě nějaké události, např. příchozí SMS zprávy, změny I/O vstupů či dat ze sériové linky odeslaných z prostředí HyperTerminal přijmout data. Ty pak podle předprogramované zprávy odeslat formou SMS zprávy na mobilní telefon uživatele. K tomuto ovšem nebyla vytvořena programová podpora, ale jako vhodný nástroj s ASCII ovladačem by mohl být použit stejně jako v případě tvorby *Jenie Net*. aplikace Control Web. Jednalo by se o rozšíření *Jenie Net*. aplikace. Příchozí data je také možné lokálně ukládat v txt souboru, který je příchozí událostí založen. Na obr. 118 můžeme vidět možnost připojení *Jenie* sítě, kde PC tvoří zmiňovanou bránu pro přenos dat na mobilní telefon přes GSM základovou desku s modulem Siemens.



Obr. 118 Distribuovaná bezdrátová síť rozšířená o přenos dat pomocí GSM

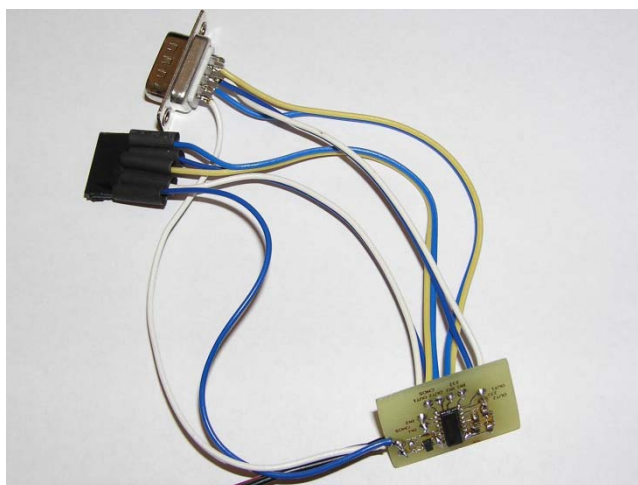
V tomto návrhu řešení nebyla „brána“ především z časového hlediska dokončena. Ta by data od koordinátoru přijala, upravila je do vhodného formátu a předala je na komunikační COM port základové desky s GSM modulem. Ten se již postará o jejich odeslání. V konečné podobě by pak uživatel mohl dostávat informace z technologického procesu (informaci o regulované veličině, nastavené žádané hodnotě, velikosti akčního zásahu, nastavených parametrech regulátoru apod.) nebo informace ze senzorové sítě v podobě např. modul_pokoj_teplosta 28°C přímo na mobilní telefon nebo do jiné GSM stanice. O data by si přitom mohl žádat pomocí SMS zprávy pro případ oboustranné komunikace. Nebo by mohly být posílány automaticky v nastavené periodě, případně v závislosti na nějaké události (překročení mezní hodnoty atd.). Pro přenos dat lze využít také služby jako GPRS/EDGE apod. V současné době se také na trhu objevily GPRS-RS232 komunikátory, které dokáží přenášet data ze sériové linky v sítích GSM s využitím GPRS služeb. Tyto komunikátory jsou již předprogramovány a uživatel pouze provádí konfiguraci zařízení, jako volbu bezpečnosti, definování SMS ovládání, možnosti vzdálené diagnostiky apod.

Druhou možností by mohla být varianta využití sériového rozhraní pro spojení koordinátoru senzorové Jenie sítě přímo se základovou GSM deskou. Moduly Jennic mají k dispozici 2 UART rozhraní, přičemž jedno může přenášet data do PC a druhé data odesílat přímo do GSM modulu vloženého do základové desky, viz obr. 119.



Obr. 119 Koncepte připojení koordinátoru k GSM stanici přes sériové rozhraní

Tato druhá varianta nechává veškerou úpravu dat byt' ze senzorové sítě či z řízeného procesu na Jennic modulu JN5139 nebo na GSM modulu AC75, popř. TC65. Nevýhodou je, že se bude využívat výpočetního výkonu modulů a PC, které má nadbytek tohoto výkonu, bude téměř nevytíženo. Aby bylo možné spojit oba moduly, bylo nutné vytvořit převodník mezi napěťovými úrovněmi TTL 3,3 V a RS232, viz obr. 120. Základ převodníku tvoří stabilizátor napětí 5 V napájející obvod MAX232, jehož popis lze nalézt v datasheetu, viz [MAX232 Datasheet 2010].



Obr. 120 Převodník mezi úrovněmi TTL a RS232

Tedy jediným článkem chybějícím v tomto přímém přenosu dat mezi dvěma technologiemi je úprava kódu v Jennic modulu pro odesílání dat na UART1 a jejich předání do GSM modulu. Na straně GSM modulu je třeba upravit vytvořenou aplikaci, která má již naprogramovanou část inicializace SMS adaptéru pro odesílání SMS zpráv na daná telefonní čísla. Zde je nutné rozhodnout, zda budou odesílána všechna měřená data mezi moduly, nebo již pouze hodnoty, jako např. průměr z měřené série dat, rozptyl, minimální či maximální hodnoty apod.

Uvedené GSM moduly jsou poměrně cenově nákladné. V rámci výuky na katedře automatizační techniky a řízení 352 byl vytvořen model, který primárně slouží jako zabezpečovací systém a ukázka možností komunikace mobilního telefonu s mikroprocesorem. Celý model je řízen mikroprocesorem PIC16F628, který tvoří GSM pager přijímající a odesílající data ve formě AT příkazů do mobilního telefonu, který tvoří bránu mezi pagerem a GSM sítí. Typicky např. starší mobilní telefony od společnosti Siemens, např. Siemens C35, popř. starší typy Sony Ericsson obsahují modem, přes který je možné telefon ovládat pomocí AT příkazů. Celý vytvořený model můžeme vidět na obr. 121.



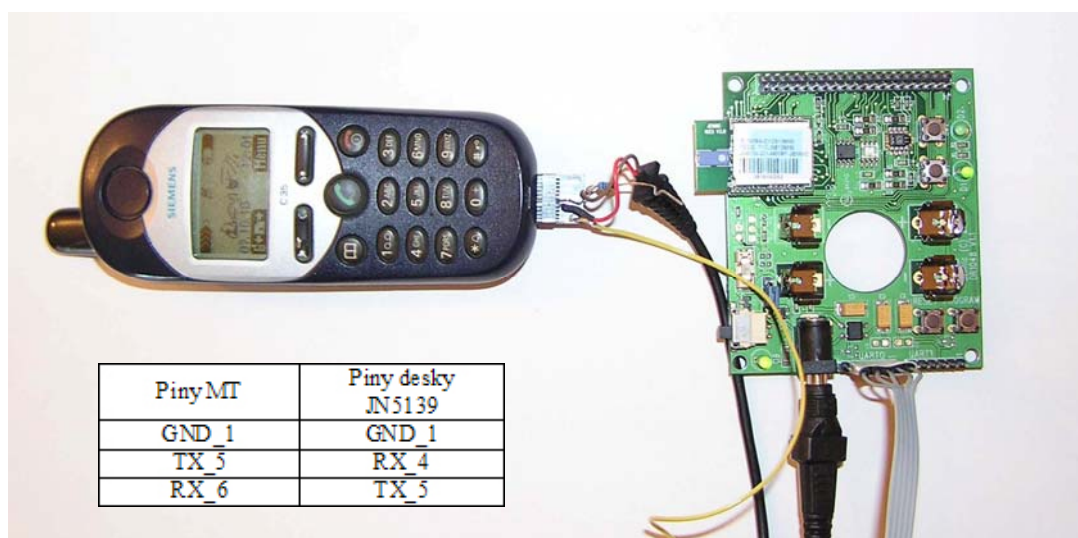
Obr. 121 Model zabezpečovacího bezdrátového systému [Mahdal, 2008]

O tomto modelu se zmiňujeme proto, že jej lze ve své sekundární funkci využít pro sledování digitálních výstupů bezdrátového Jennic modulu, který je přímo těmito výstupy spojen s GSM pagerem odesílající jejich stavy přes mobilní telefon do sítě GSM. Model nebudeme v této práci celý popisovat, více o tomto modelu, viz [Mahdal, 2008]. Je to pouze další varianta jak spojit dvě rozdílné komunikační technologie.

16.2 Připojení bezdrátového modulu k mobilnímu telefonu

Při tomto rozboru možností spojení bezdrátových modulů s modelem zabezpečovacího systému nám byla vnuknuta myšlenka, proč nepřipojit mobilní telefon, který tvoří základ modelu, přímo k bezdrátovému modulu na UART komunikační port a neposílat z bezdrátového modulu AT příkazy přímo na mobilní telefon. Obě zařízení totiž používají pro komunikaci stejné napěťové úrovně TTL logiky, tedy pro hodnotu logické 0 max 0,8 V a pro logickou 1 min 2 V. Tady se nabízí také více možností, ke které bezdrátové stanici by mohl být mobilní telefon připojen. Může být připojen přímo ke koordinátoru sítě, ovšem zde by musel modul využívat pro přenos sériové rozhraní UART1, protože UART0 je obsazen pro komunikaci s PC, potažmo *Jenie Net*. aplikací.

Mobilní telefon může být připojen i k sériovému rozhraní UART0, neboť data může odesílat libovolný modul v senzorové *Jenie* síti, směrovač nebo koncová stanice. V tomto případě může koordinátor z analýzy přijatých dat celé senzorové sítě poslat stanici s připojeným mobilním telefonem data, která budou odeslána do nadřazené sítě. Na obr. 122 můžeme vidět spojení bezdrátového modulu (koncové stanice) s mobilním telefonem Siemens C35. Linka nevyužívá vodiče RTS a CTS. Seznam AT příkazů a význam jednotlivých pinů mobilního telefonu můžeme nalézt, viz [Bramo 2010].



Obr. 122 Připojení modulu JN5139 k mobilnímu telefonu Siemens C35

Takto vytvořené spojení je ideální nejen z hlediska finančních nákladů, ale také ve své jednoduchosti. Bezdrátový modul má naprogramovány funkce, které v případě překročení nastavených mezních stavů odesílají informaci přes mobilní telefon přímo k uživateli. V naší aplikaci je testována měřená hodnota relativní vlhkosti a teploty. Při překročení stanovených mezních hodnot odesílá modul do MT příkazy pro zahájení volání na přednastavené telefonní číslo nebo odesílá SMS. Jednoduchá podmínka např. pro testování relativní vlhkosti na základě které dojde k tomuto stavu, vypadá následovně:

```

if (sSensorReading.u16Humid >= 95 & & SendSMS) //rel. vlhkost
    prekrocila hodnotu 59,4 %[vypocet (100/160)*95]
    a zaroven SendSMS ma hodnotu TRUE
{
    SMS(); // funkce, která odesílá SMS zprávu
    SendSMS = FALSE; //SMS byla odeslána
}
if (sSensorReading.u16Humid < 95 & & SendSMS == FALSE)
{
    SendSMS = TRUE;
}

```

Podmínka je součástí funkce *vSensor_Tick()*, která je periodicky volána při přerušení časovačem. Tato funkce je klíčová, protože řídí i výpočet regulačního zásahu pro řízení teplozdušného modelu. Testování překročení definovaného stavu je prováděno bezdrátově koordinátorem sítě, potažmo *Jenie Net*. aplikací pro síť *Jenie*. Proměnná *sSensorReading.u16Humid* je typu Integer a je definována jako globální proměnná. Je použita i pro funkci *SMS()* odesílající SMS zprávu. Proměnná *SendSMS*, která je datového typu Bool pouze testuje, zda již byla SMS odeslána či nikoli. Její počáteční hodnota je TRUE. Funkce *SMS()* musí testovat, zda byla skutečně SMS zpráva odeslána, tedy čekat na potvrzující zprávu od mobilního telefonu ve tvaru „OK“. V další kapitole si popíšeme, jak odesílání SMS zpráv probíhá.

16.3 Odesílání SMS a popis PDU rámce

V případě, že chceme pouze telefonovat na telefonní číslo je situace jednoduchá, protože použijeme AT příkaz z tabulky V spolu s telefonním číslem (např. ATD777123456). Při odesílání SMS je situace o něco složitější. Pracujeme z PDU formátem, který má definovanou strukturu a pomocí něj můžeme odesílat z mikroprocesoru JN5139 zprávy, které si sami skládáme. V tomto formátu můžeme v SMS odeslat i aktuální datum a čas, kdy k události došlo včetně aktuálního stavu události (překročená hodnota). PDU (Protocol Description Unit) je protokol, pomocí kterého je možné přenášet SMS zprávy v GSM síti. Každý přenášený rámec je složen z hlavičky a těla. Hlavička obsahuje základní informace o příjemci/odesílateli, číslu SMS centra, platnosti zprávy, datumu, času apod. Tělo obsahuje text zprávy, který je komprimován. Protože při přenášení SMS zpráv se využívá jen první polovina tabulky ASCII znaků (128 znaků), kde každý z těchto znaků má na prvním místě v binární podobě nulu, může být tato nula pro komprimaci vypuštěna. PDU rámce se navíc rozlišují podle toho, zda se jedná o příchozí, nebo odchozí rámec.

Příchozí PDU rámec:

HL	SC	Typ PDU	OA	PID	DCS	SCTS	UDL	UD
----	----	---------	----	-----	-----	------	-----	----

Odchozí PDU rámeček:

HL	SC	Typ PDU	MR	DA	PID	DCS	VP	UDL	UD
----	----	---------	----	----	-----	-----	----	-----	----

Význam:

HL (Head Length) – délka hlavičky SC, uváděn v hexadecimálním tvaru.

SC (Service Center) – typ a telefonní číslo servisního střediska, na které se odesílají SMS, viz OA, DA.

TYP PDU – je složen z 8 bitů a je odlišný pro příchozí a odchozí zprávu, viz Typ PDU.

MR (Message Reference) – udává počet odeslaných SMS do střediska služeb. Jedna zpráva znamená hodnotu MR = 0. Udáváno v hexadecimálním tvaru.

OA, DA (Originator Adress, Destination Adress) – OA obsahuje číslo odesílatele a DA pak číslo adresáta. Tyto hodnoty mají formace o délce a typu telefonního čísla. Délka je navíc udávána v hexadecimálním tvaru a typ čísla může být ve dvojí podobě. V mezinárodním tvaru (+420) mající hodnotu 91 nebo národním tvaru (pouze telefonní číslo) mající hodnotu 81. Pro telefonní číslo je navíc nutné prohodit horní a dolní část každého Byte (oktetu) a v případě mezinárodní podoby telefonního čísla se znaménko + vypustí.

PID (Protocol Identifier) – identifikace typu přenášeného protokolu, kde 0 znamená standardní SMS zprávu, např. 4 udává klasický hovor. Uváděno v hexadecimálním tvaru.

DCS (Data Coding Scheme) – je udáváno v hexadecimálním tvaru a vyjadřuje, jakým způsobem se text zprávy přenáší. Kde:

11110x00 – znamená 7-mi bitové (0) nebo 8-mi bitové (1) kódování

111100xx – xx umožňují další volby

00 – zobrazení SMS na displej

01 – uloží SMS na SIM kartu

10 – kód určený speciálně pro SIM kartu

11 – uložení SMS do telefonu

SCTS (Service Center Time Stamp) – má pro všechny oktety prohozený horní a dolní Byte. Udává datum a čas, kdy byla zpráva doručena do servisního střediska ve formátu *YYMMDDhhmmss*, kde *tz* udává časové pásmo.

VP (Validity Period) – určuje dobu platnosti SMS zprávy. Pokud nebude do této doby SMS zpráva doručena příjemci, pak je střediskem smazána. Zápis může být

v absolutní nebo relativní podobě. Relativní formát se udává v hexadecimální podobě a jeho výpočet vypadá následovně:

VP je 0 až 143: $(VP + 1) * 5 = \text{počet minut}$

VP je 144 až 167: $((VP - 143)/2) + 12 \text{ hodin} = \text{počet hodin}$

VP je 168 až 196: $(VP - 166) * 1 \text{ den} = \text{počet dnů}$

VP je 197 až 255: $(VP - 192) * 1 \text{ týden} = \text{počet týdnů}$

UDL (User DataLength) – udává počet znaků ve zprávě, v hexa tvaru.

UD (User Data) – text zprávy, který je kódován 7-mi nebo 8-mi bitově.

Více o popisu PDU formátu zpráv, viz [SMS a PDU formát 2010].

Hlavička celého PDU rámce začíná od Typu PDU a končí UDL. Tělo rámce se skládá jen z UD. Velikost HL a SC se do příchozí nebo odchozí zprávy nepočítají.

Typ PDU má velikost jeden Byte a jednotlivé bity mají určitý význam. Význam jednotlivých bitů v příchozím či odchozím PDU rámci vypadá následovně:

Typ PDU pro příchozí zprávy:

Bit 7	6	5	4	3	2	1	0
RP	UDHI	SRI			MMS	MTI	

Typ PDU pro odchozí zprávy:

Bit 7	6	5	4	3	2	1	0
RP	UDHI	SRR	VPF		RD	MTI	

Význam:

RP – bit RP označuje, že zprávu hradí odesílatel.

UDHI – udává přítomnost hlavičky.

SRR – v případě nastavení informace o doručení zprávy musí být i tento bit aktivní.

SRI – určuje, zda bude odeslána informace o doručení zprávy.

VPF – dává informaci o formátu uložení informace doby platnosti zprávy.

RD – zamezuje středisku SMS příjem diagramu v případě, že odesíláme ještě jednu SMS zprávu se stejným MR a DA jako předešlá SMS zpráva.

MMS – udává informaci o tom, zda se SMS ve středisku vyskytuje zpráva pro doručení.

MTI – je dvoubitová hodnota udávající druh zprávy. 00 – přijatá zpráva, 01 – odeslaná zpráva.

Chceme odeslat SMS, kde telefonní číslo servisního střediska v mezinárodním tvaru je +420602909909, telefonní číslo příjemce např. 777123456 (telefonní číslo příjemce je

vymyšlené) a vyžadujeme potvrzení o doručení zprávy. Text zprávy bude kódován 7-mi bitově a bude vyžadována doba platnosti 1 den. Zpráva bude mít obsah „Vlhkost je 59%.“ a bude zobrazena na displeji mobilního telefonu. Hodnota vlhkosti je doplněna z proměnné *sSensorReading.u16Humid* z aktuálního měření.

Nejdříve se budeme zabývat vytvořením hlavičky z celého rámce. Telefonní číslo servisního střediska má mezinárodní tvar, takže bude mít hodnotu 91. Z tohoto čísla odstraníme znaménko „+“ a u každého oktetu (Byte) čísla zaměníme jeho horní a dolní část. Výsledný tvar čísla a tedy hodnota SC (spolu s hodnotou 91) je následující:

91246020099990

Délka SC je tedy 7 Byte, což znamená v hexadecimální podobě 07 a tuto hodnotu bude nabývat HL. Protože požadujeme potvrzení o doručení, bude mít Byte Typ PDU posloupnost bitů 00110001, což znamená číslo v hexadecimálním tvaru 31. Hodnota MR je 00 (budeme odesílat pouze jednu zprávu). Pro telefonní číslo příjemce platí podobné pravidlo jako pro telefonní číslo servisního střediska. Délka telefonního čísla je hodnota 09 hexadecimálně, tvar čísla je národní (hodnota 81) a protože číslo je liché, musí být doplněno o další znak na konec čísla, např. F. Opět zaměníme horní a dolní část každého Byte telefonního čísla a výsledek spolu s délkou čísla a tvarem je hodnota DA, která bude vypadat následovně:

098177173254F6

PID bude mít hodnotu 00, protože odesíláme standardní SMS zprávu. Zprávu chceme zobrazit na displeji mobilního telefonu a kódování bude 7-mi bitové, takže DCS bude mít hodnotu 11110000, což je hodnota F0 hexadecimálně. VP podle požadované doby platnosti SMS 1 den (24 hodin) bude mít hodnotu $((167 - 143)/2) + 12$ hodin = 24 hodin, což odpovídá hexadecimální hodnotě A7 (tj. 167 dekadicky). UDL má hodnotu podle délky posílaného textu, neboli počtu znaků 15 (0F). Celá hlavička PDU rámce vypadá následovně:

07|91246020099990|31|00|098177173254F6|00|F0|A7|0F

Tělo rámce a jeho komprimace je o něco málo složitější, protože je potřeba převést každý znak dle tabulky ASCII znaků na jeho dekadickou číselnou hodnotu, poté na binární vyjádření, kde v případě méně bitů jak 8 doplníme přední část Byte nulami. 7-mi bitové vyjádření získáme odebráním první nuly z 8-mi bitového vyjádření. Výslednou přenášenou hodnotu UD dostaneme tak, že z řádku 7-mi bitového vyjádření znaku převedeme patřičný počet bitů podle bitové pozice znaku v textu na začátek do předchozího sloupce a doplníme bity ze stejného sloupce. Nejdříve se převádí jeden bit až do 7-mi bitů a pak se celý postup neustále opakuje. Hodnota UD je ve výsledku převedena do hexadecimální podoby. Celý postup komprimace zprávy nám znázorňuje tab. 13.

Tab. 13 Způsob komprimace přenášeného textu

Znak	V	I	h	k	o	s	t	
ASCII	86	108	104	107	111	115	116	32
8 bitů	01010110	01101100	01101000	01101011	01101111	01110011	01110100	00100000
7 bitů	1010110	1101100	1101000	1101011	1101111	1110011	1110100	0100000
UD	01010110	00110110	01111010	11111101	10011110	11010011	01000001	
UD (hex)	56	36	7A	FD	9E	D3	41	
Znak	j	e		5	9	%	.	
ASCII	106	101	32	53	57	37	46	
8 bitů	01101010	01100101	00100000	00110101	00111001	00100101	00101110	
7 bitů	1101010	1100101	0100000	0110101	0111001	0100101	0101110	
UD	11101010	00110010	10101000	10010110	00101011	10111001	00000000	
UD (hex)	EA	32	A8	96	2B	B9	00	

Poslední znak „.“ má doplněny do UD nuly, aby výsledná hodnota měla velikost 1 Byte. V našem případě je tato hodnota nulová i po převodu do hexadecimálního tvaru. Více o komprimování textu, viz [Lauterbach 2004]. Komprimací textu ušetříme v našem případě 1 Byte, nicméně při počtu 160 znaků již ušetříme 20 Bytů. Z tab. 13 vidíme, že každý osmý znak je plně zkomprimován. Takže celý přenášený PDU rámec (hlavička i tělo rámce) resp. celý PDU datagram vypadá následovně:

07|91246020099990|31|00|098177173254F6|00|F0|A7|0F|56367AFD9ED341EA32A8962BB900

Takto vytvořenou zprávu již lze odeslat z bezdrátového modulu do mobilního telefonu. Pro odeslání SMS ve tvaru PDU použijeme příkaz z tabulky v příloze V. Tedy AT+CMGS=27, kde číslo 27 označuje počet oktetů (Byte) datagramu bez hodnot HL a SC. Při správném odeslání obdržíme od telefonu odpověď:

+CMGS: 105 //105 je označení SMS telefonem

OK

Pokud máme ke konektoru mobilního telefonu připojeno nabíjení, můžeme pomocí zmíněných AT příkazů testovat kapacitu akumulátoru a ovládat dobíjení telefonu. Bezdrátový modul, který je napájen akumulátorem, byť jako zdroj pro dobíjení jeho kapacity využívá solární panel, může přímo ze solárního článku nabíjet i mobilní telefon. Digitálními výstupy modulu se spíná jeho nabíjení. Pokud solární článek není schopen vyvinout dostatečné napětí pro dobíjení, alespoň 5 V, je potřeba doplnit zapojení o zvyšující měnič, který bude napájen přímo z akumulátoru.

Mikroprocesor JN5139 může také aktivovat naslouchání při příchozím hovoru, řídit zapnutí telefonu, či přijímat SMS zprávy od uživatele, které přicházejí na připojený mobilní telefon. Tato varianta zatím nebyla programována, ale je to možnost pro další

řešení v této oblasti. Koncová stanice navíc může data od uživatele zpětně odesílat ke koordinátoru sítě a např. nastavit vybraným nebo všem bezdrátovým modulům v síti analogové, digitální výstupy apod. Typickým příkladem může být vzdálené nastavení teploty v domě, vypnutí či zapnutí světel, klimatizace, zabezpečovacího systému, ale nemusí se jen jednat o využití v „inteligentní“ domácnosti, ale může to být třeba vzdálené zapnutí motorů či dokonce nastavení parametrů regulátoru pro technologický proces, což je další možnost doplňující vytvořenou *Jenie Net.* aplikaci.

17 Závěr

Disertační práce je zacílena na bezdrátový standard IEEE 802.15.4 a bezdrátové moduly Jennic s označením JN5139. Moduly se skládají z vlastního mikroprocesoru, vnitřní paměti, komunikačního rozhraní a rozhraní pro připojení externích periférií. K takovému bezdrátovému modulu je možné připojit snímače pro měření různých fyzikálních veličin, jako např. intenzity osvětlení, teploty, relativní vlhkosti, hluku, vibrací apod. Data ze snímačů lze získávat a následně přenášet dle síťové topologie přes určené stanice do základnových stanic k dalšímu vyhodnocení a zpracování. Samotné zpracování dat však nemusí vždy probíhat jen ve střediskovém vyhodnocovacím centru nebo dohledovém centru, ale tuto úlohu může zastat i samotný modul, který může vysílat data již jistým způsobem předzpracovaná či jinak vhodně upravená. Modul může data vysílat v určitých časových intervalech samostatně nebo je v takových intervalech tázán. Tímto nemusí být moduly v síti neustále aktivní a v čase kdy nevysílají, jsou uvedeny do tzv. „sleep“ režimu, který velmi výrazným způsobem redukuje spotřebu bezdrátových stanic. V takovémto stavu jsou moduly schopny pracovat při akumulátorovém napájení až několik let. Zde se utváří myšlenka různých možností nabíjení akumulátoru. Jako velmi efektivní způsob napájení pro plošně distribuované bezdrátové sítě ve volném prostředí je využití slunečního záření. Modul vybavený vyrobeným solárním článkem s elektronikou, která umožňuje nabíjení akumulátoru a napájení modulu je téměř bezúdržbový a může pracovat několik let. V práci je tato alternativa napájení popsána společně s vytvořeným funkčním celkem od solárního článku až po samotný bezdrátový modul.

Výše uvedená řešení se spíše vztahují ke komunikačním jednotkám, které jsou určitým způsobem odizolovány od možnosti napájení z elektrické sítě a které sbírají a přenášejí naměřená data. Typickým příkladem může být např. meteorologická stanice sbírající data z různých míst a monitorující povodňové aktivity. Řízení technologických procesů je poněkud náročnější na odběr elektrické energie odvíjející se od požadavků na samotný proces. Pracovní výdrž z akumulátorového napájení se tak podstatně snižuje, ovšem i tak mají moduly velmi malý odběr elektrické energie, kterou potřebují pro svůj provoz, což je také velká výhoda standardu IEEE 802.15.4.

Práce se dále zabývá tvorbou senzorových bezdrátových sítí využívající komunikační standard IEEE 802.15.4. Ovšem vytvořené aplikace jsou programovány na jiné síťové vrstvě a vyšších vrstvách ISO/OSI modelu, než na které jsme standardně zvyklí a které jsou definovány ZigBee Alliancí. Jedná se o síťovou vrstvu *JenNet*, resp. *JenNet* protokol stack, který se od ZigBee protokolu stack odlišuje v komunikaci mezi bezdrátovými moduly, ve způsobu programování a možnostech síťové topologie. V dalších kapitolách práce jsou nastíněny možné topologie bezdrátových sítí pro měření veličin pomocí připojených snímačů k senzorovým a řídícím deskám. Jedná se o plošné získávání dat z distribuovaných senzorových sítí. Byly navrženy a vytvořeny dva typy sítí s topologií strom. Obě sítě využívají zabezpečený přenos dat. První síť má předem definovanou topologii a počet bezdrátových stanic, ke kterým se můžeme připojit. Pro komunikaci se

používá tunelové spojení, kterým je možné ovládat další bezdrátové moduly. Tímto způsobem pak můžeme pomocí AT příkazů vzdáleně ovládat periferie senzorových desek, ke kterým jsou bezdrátové moduly připojeny a měřit hodnoty veličin na dotaz či automaticky. Naproti tomu druhá senzorová síť je navržena jako univerzální a bezdrátové stanice se připojují automaticky po zapnutí ke svým rodičům až ke koordinátoru sítě, který je na vrcholu celé topologie. Síť využívají časové i událostní měření dat.

Pro distribuované senzorové sítě se v dnešní době nacházejí monitorovací a řídicí aplikace teprve ve vývoji. Pro použitý typ bezdrátových modulů jsou zatím možnosti monitorování sítě a ovládání jednotlivých modulů velmi omezené či nepodporované. Proto byla naprogramována monitorovací a řídicí aplikace s názvem *Jenie Net*. Aplikace je vytvořena v systému SCADA/HMI, v prostředí Control Web 5. *Jenie Net* obsahuje prostředí *ATJenie* pro komunikaci s programovanou předem definovanou bezdrátovou sítí, kde máme k dispozici lokální i bezdrátové měření veličin. Dovoluje síťové nastavení jednotlivých modulů pro plné (FFD) nebo omezené (RFD) funkce. Čili do funkce koordinátoru sítě, směrovače nebo koncové stanice. U druhého typu sítě nazvané *Jenie*, definované jako univerzální, nám *Jenie Net* aplikace zobrazuje každou připojenou stanici do sítě, její identifikaci pomocí MAC adresy a měřené veličiny. Moduly po připojení automaticky odesílají měřené hodnoty s danou periodou vzorkování, kterou je možné nastavit. Koordinátor sítě vždy zakládá síť a je jakousi branou mezi celou sítí a PC potažmo programovanou aplikací *Jenie Net*.

Součástí této druhé sítě *Jenie* jsou také moduly, které umožňují řízení technologického procesu. To přináší velký význam pro testování bezdrátové sítě na standardu 802.15.4 pro uplatnění v řízení procesů. V našem případě byl vybrán pro demonstraci technologického procesu teplovzdušný model, který disponuje množstvím regulačních úloh. Tedy libovolný modul v univerzální bezdrátové síti může tento proces řídit. Pro všechny soustavy modelu byla provedena identifikace a syntéza regulačního obvodu. *Jenie Net* přijímá data z regulačního procesu, zpracovává je, ukládá a vizualizuje regulaci na vytvořeném 3D modelu. Nechybí také vzdálené nastavení parametrů regulátoru, který je do bezdrátového modulu naprogramován. Na výběr je nejen typ soustavy, kterou chceme regulovat, ale také volba typu regulace.

Celá aplikace *Jenie Net* je navíc zpřístupněna do prostředí Intranet/Internet, kde se aplikace stává nezávislá na systémové platformě. Uživatel nemusí mít instalován žádný software, postačí mu pro přístup k aplikaci pouze webový prohlížeč.

Diskutovaným a dalším nezpracovaným tématem týkající se modulů Jennic a senzorových sítí je jejich dosah. Proto je v práci také testován dosah bezdrátových stanic, měření úrovně signálu v závislosti na vzdálenosti modulů s měřením PER a LQI při přenosu stanoveného množství dat. Testování probíhalo v obecně zarušeném prostředí a podává informaci o dosahu bezdrátových stanic.

Tento „handicap“ týkající se dosahu senzorových sítí kompenzujeme vysoce-dosahovými sítěmi GSM (GSM technologií a její službami). Jsou nastíněny jisté možnosti

dalších směrů pro přenos dat na větší vzdálenosti z méně-dosahové sítě standardu IEEE 802.15.4. V této části byly otestovány bezdrátové GSM moduly od společnosti Siemens, včetně vytvořených hardwarových prostředků pro napojení těchto modulů na moduly Jennic JN5139. Jako další alternativa byla navržena a prakticky otestována možnost napojení Jennic modulů na mobilní telefon, který tvoří komunikační bránu mezi sítí GSM a vytvořenou sítí *Jenie*. Toto řešení umožňuje odesílat mezní stavy měřených veličin jako je teplota, relativní vlhkost či osvětlení formou SMS, upozornit voláním na telefonní číslo uživatele nebo je možné měřené hodnoty odesílat v určitých časových intervalech.

Další vývoj v této oblasti by mohl být soustředěn na využití dalších druhů energeticky nenáročných senzorů, čímž by se rozšířily aplikační možnosti vytvořených sítí a *Jenie Net.* aplikace. Dále rozšíření způsobu měření veličin o nové událostní a časově řízené algoritmy s dalšími možnostmi zpracování měřených dat, jejich filtrací apod. Nesmíme opomenout implementaci jiných způsobů řízení procesu s ohledem na optimalizaci použitých algoritmů. Navrhnout odlišné způsoby a otestovat obousměrný přenos dat z vytvořených sítí do vysoce-dosahových sítí, které nemusí být nutně soustředěny pouze na GSM technologii, ale např. na Wi-Fi, WiMAX apod.

Celkový přínos disertační práce lze shrnout do několika hlavních bodů:

1. Návrh, tvorba a implementace bezdrátových senzorových sítí standardu IEEE 802.15.4.
2. Vytvoření a naprogramování dvou typů senzorových sítí *ATJenie* a *Jenie* na *JenNet* síťovém protokolu.
3. Testování vytvořených senzorových sítí pro měření veličin teploty, relativní vlhkosti, osvětlení a napětí napájecích akumulátorů.
4. Návrh a implementace algoritmů pro úsporu elektrické energie bezdrátových modulů v síťové topologii strom.
5. Vytvoření funkčního celku alternativního způsobu napájení modulů JN5139 solárním panelem včetně přizpůsobovacích obvodů a obvodů pro nabíjení akumulátorů.
6. Testování vhodnosti technologie standardu IEEE 802.15.4 a Jennic bezdrátových modulů pro řízení procesů.
7. Realizace a začlenění bezdrátových modulů do řízeného procesu (teplovzdušného modelu). Regulace procesu s bezdrátovým odesláním dat z procesu a bezdrátové konfigurace modulu a parametrů regulátoru, který přímo technologický proces řídí. Implementace algoritmů regulátorů, tvorba elektronické jednotky pro teplovzdušný model.
8. Tvorba softwarové podpory s názvem *Jenie Net*. pro programované senzorové sítě a technologický proces se zpřístupněním aplikace do sítě Intranet/Internet (nezávislost na systémové platformě).
9. Měření dosahu použitých bezdrátových stanic v síti v závislosti na úrovni signálu s měřením PER a LQI.
10. Návrh a realizace možností napojení senzorových sítí (méně-dosahových sítí) na vysoce-dosahové sítě GSM technologie. Bylo realizováno spojení modulů JN5139 s mobilním telefonem a testovány GSM moduly Siemens jako další varianta řešení. Spojení dovoluje odeslat mezní stavy měřených veličin formou SMS (pomocí PDU formátu) či upozornit voláním na zvolené telefonní číslo.

Použitá literatura

- [1] BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. 1. vydání, nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2003, 664 s. ISBN: 80-7300-020-2.
- [2] BALŠÁNEK, M. 2007. *Senzorové nody s bezdrátovou komunikací pro monitorování procesů*. Ostrava: Disertační práce, katedra ATR VŠB-TU Ostrava, 2007. 130 s.
- [3] *Bluetooth technologie* [online]. [2009-07-06], dostupné na adrese: <URL: <http://www.bluetooth.com>>.
- [4] *Bramo – seznam AT příkazů a zapojení konektoru pro mobilní telefon Siemens C35* [online]. [2010-06-18], dostupné na adrese: <URL: <http://bramo.ic.cz/atp.htm>>.
- [5] CAPALINI, R. 2010. *Lokalizace uzlů v senzorové síti ZigBee*. VUT Brno, Fakulta informačních technologií, ústav informačních systémů. 2010. Diplomová práce, 40 s.
- [6] *Control Web*. Elektronická nápověda Control Web 5. Moravské přístroje [online]. [2010-03-05], dostupné na adrese: <URL: [http:// http://www.mii.cz](http://http://www.mii.cz) >.
- [7] *Crossbow MDA, MTS Sensor boards Users Manual* [online]. [2010-05-05], available from www: <URL: [http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MTS_MDA_Data sheet.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MTS_MDA_Data_sheet.pdf)>.
- [8] *Crossbow module Mica2* [online]. [2010-05-05], available from www: <URL: <https://www.eol.ucar.edu/rtf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>>.
- [9] *Crossbow module Micaz* [online]. [2010-05-05], available from www: <URL: http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz_datasheet.pdf>.
- [10] *Energetická Spotřeba Modulu Jn5139* [online]. [2010-12-08], available from www: <URL: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-AN-1001-Power-Estimation.pdf>.
- [11] *Evaluation Kit 13192EVK* [online]. [2010-07-15], available from www: <URL: http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/user_guide/802154EVKUG.pdf>.
- [12] FARAHANI, S. 2008. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes, Elsevier USA, 2008, 339 pp. ISBN: 978-0-7506-8393-7.
- [13] GIROD, L., STATHOPOULOS, T., RAMANATHAN, A. 2004. *System for Simulation, and Deployment of Heterogeneous Sensor Networks*, SenSys '04, November 2004, Baltimore - Maryland, USA, 201-213 p. ISBN: 1-58113-879-2.
- [14] GISLASON, D. 2008. *ZigBee Wireless Networking*. Newnes, Elsevier USA, 2008, 425 pp. ISBN: 978-0-7506-8597-9.

- [15] GUOLIANG, XING., CHENYANG, LU., YING, ZHANG., QINGFENG, HUANG., ROBERT, PLESS. 2005. *Minimum Power Configuration for Wireless Communication in Sensor Networks*. Proceedings of the MobiHoc, 2005. 33 pp.
- [16] HANUS, S. 2003. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Brno. 2003. 135pp. ISBN: 80-214-1833-8.
- [17] HEROUT, P. 2004. *Učebnice jazyka C*. 4.vyd. České Budějovice: KOPP a.s., 2004. ISBN: 978-80-7232-383-8.
- [18] HILL, J., HORTON, M., KLING, R., KRISHNAMURTHY, L. 2004. *The platforms enabling wireless sensor network*. Communications of the ACM. Publisher: ACM New York, 2004. 41-46 pp. ISSN: 0001-0782.
- [19] HOUDA, L., AFIFI, H., DE SANTIS., C. 2007. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMAX*. 1st ed. Springer 2007, 311 pp. ISBN 978-1-4020-5396-2.
- [20] *Jenie API* [online]. [2010-04-17], available from www: <URL: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-RM-2001-Integrated-Peripherals-API.pdf>.
- [21] *Jennic* [online]. [2010-05-18], available from www: <URL: <http://www.jennic.com/applications/overview>>.
- [22] *Jennic Datasheets* [online]. [2008-07-16], available from www: <URL: http://www.jennic.com/jennic_support/datasheets/>.
- [23] *Jennic intelligent street lighting* [online]. [2009-07-16], available from www: <URL: http://www.jennic.com/files/files/white_papers/JN-WP-7001-Intelligent-Street-Lighting.pdf>.
- [24] *Jennic JenNet* [online]. [2009-10-10], available from www: <URL: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-UG-3041-JenNet-User-Guide.pdf>.
- [25] *Jennic JN5139 module* [online]. [2009-10-08]], available from www: <URL: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-DS-JN5139-001-1v8.pdf>.
- [26] *Jennic Power Estimation* [online]. [2010-09-08], available from www: <URL: http://www.jennic.com/files/support_files/JN-AN-1001-Power-Estimation.pdf>.
- [27] *Jennic Reference Manuals* [online]. [2008-07-16], available from www: <URL: http://www.jennic.com/jennic_support/reference_manuals/>.
- [28] *Jennic User Guides* [online]. [2008-07-16], available from www: <URL: http://www.jennic.com/jennic_support/user_guides/>.
- [29] *Jennic ZigBee e-learning* [online]. [2008-07-16], available from www: <URL: <http://www.jennic.com/elearning/zigbee/index.htm>>.
- [30] KERNIGHAN, B., W., RITCHIE, D., M. 2006. *Programovací jazyk C*. Computer Press, a.s. Brno, 2006. 287 s. ISBN: 80-251-0897-X.

- [31] KOHVAKKA, M., KUORILEHTO, M., HÄNNIKÄINEN, M., HÄMÄLÄINEN, TIMO D. 2006. *Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications*. International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. 48-57 pp. ISBN: 1-59593-487-1.
- [32] LAUTERBACH, M. 2004. *Datová komunikace s telefonem Siemens x35i*. SPSŠE a VOŠ Liberec, 2004, pp. 33. Absolventská práce.
- [33] MAHDAL M. 2006. *Řízení a vizualizace laboratorního modelu nádrží*. VŠB – TU Ostrava, 2006. Diplomová práce, 73 s.
- [34] MAYER, K., FRITSCH, W. IP-enabled Wireless Sensor Networks and their integration into the Internet. *Proc. of the First International Conference on Integrated Internet Ad-Hoc and Sensor Networks (INTERSENSE06)*, Nice, France. May 2006. 9 pp.
- [35] *MAX232 Datasheet* [online]. [2010-04-05], available from www: <URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/max232.pdf>>.
- [36] MENG-SHIUAN PAN., YU-CHEE TSENG. 2007. *The orphan problem in zigbee-based wireless sensor network*. International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. 95-98 pp. ISBN: 978-1-59593-851-0.
- [37] *Microcontrollers MC9S08GT60/32/16* [online]. [2010-08-10], available from www:<URL:http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/9S08GT603216FS.pdf?fp=1>.
- [38] MODRLÁK, O., ŠKOLNÍK, P. *Regulace otáček se zátěží (model s elektronickou zátěží)*. Studijní materiál, popis laboratorní úlohy. Technická univerzita v Liberci, Katedra řídicí techniky. 28 s.
- [39] *Module Jn5139* [online]. [2010-02-05], available from www: <URL: http://www.jennic.com/products/wireless_microcontrollers/jn5139>.
- [40] *M2MArchitect*. Stránky bezdrátových GSM modulů Siemens [online]. [2010-05-10], dostupné na adrese: <URL: <http://www.m2marchitect.cz/>>.
- [41] NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systémů*. 1. vyd. Ostrava: MONTANEX, a. s., 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
- [42] *NCP3063* [online]. 1.5 A, Step-Up/Down/Inverting Switching Regulators [2010-02-05], available from www: <URL: <http://www.icbase.com/pdf/ONS/ONS31180611.pdf>>.
- [43] OAPOS FLYNN, B., BELLIS S., DELANEY, K., BARTON, J., OAPOS MATHUNA, S.C., BARROSO, A.M., BENSON, J., ROEDIG, U., SREENAN, C. 2005. *The development of a novel minaturized modular platform for wireless sensor network*. Information Processing in Sensor Networks, Fourth International Symposium on Volume. 370-375 pp.

- [44] OHRTMAN, F. 2005. *WiMAX Handbook. Building 802.16 Wireless Networks*. 1st ed. The McGraw-Hill Companies, 261 pp. ISBN 0-07-145401-2.
- [45] *Wi-Fi Alliance* [online]. [2009-05-03], dostupné na adrese: <URL: <http://www.wi-fi.org/>>.
- [46] PAI H. CHOU., CHULSUNG PARK. 2005. *Energy-Efficient Platform Designs for Real-World Wireless Sensing Applications*. Center for Embedded Computer Systems, University of California, Irvine, USA. 913-920 pp. ISBN: 0-7803-9254-X.
- [47] PETERKA, J. *Datová revoluce ve světě GSM* [online]. [2010-03-08], dostupné na adrese: <URL: <http://www.archive.cz/a99/a910c700.php3>>.
- [48] PUŽMANOVÁ R. 2006. *Moderní komunikační sítě od A do Z*. Brno: Computer Press a.s., 2006. 432 s. ISBN 80-251-1278-0.
- [49] *Sensirion SHT11* [online]. Humidity and temperature sensor. [2009-05-03]. available from www: <URL: http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf>.
- [50] SCHLESSMAN, J., SHIM, J., KIM, I., BAEK, Y., CH., WOLF, W. 2006. *Low power, low cost, wireless camera sensor nodes For human detection*. Conference On Embedded Networked Sensor Systems. Department of Electrical Engineering, Princeton University. 363-364 pp. ISBN: 1-59593-343-3.
- [51] SMUTNÝ, L. 2001. *Řízení teplovzdušného modelu TVM pomocí PC a mikropočítačové jednotky CTRL*. Návod k laboratorní úloze. Ostrava: Katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 1999. 17 s.
- [52] SMUTNÝ, L., BALŠÁNEK, M. Intelligent Instrumentation in IWLAN – New Challenges and Trends. In *Proceedings of 7th International Carpathian Control Conference*. Rožnov pod Radhoštěm: VŠB-TU Ostrava, May 29-31, 2006, p. 525-528. ISBN 80-248-1066-2.
- [53] *SMS a PDU formát* [online]. [2010-06-20], dostupné na adrese: <URL: www.dreamfabric.com/sms/>.
- [54] *Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee* [online]. [2009-05-15] dostupné na adrese: <URL: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>>.
- [55] *Stránky odborných časopisů* [online]. [2009-06-02], dostupné na adrese: <URL: <http://www.odbornecasopisy.cz>>.
- [56] *Stránky standardizační asociace IEEE* [online]. [2009-06-11], dostupné na adrese: <URL: <http://www.ieee.org/>>.
- [57] *Stránky společnosti Pantek* [online]. Popis prostředí InTouch. [2010-10-06], dostupné na adrese: <URL: <http://pantek.cz/produkty/intouch/>>.

- [58] *Současné mobilní komunikace* [online]. [2009-06-24], dostupné na adrese: <URL: <http://honor.fi.muni.cz/tsw/2003/145.pdf>>.
- [59] ŠKUTA, J., SMUTNÝ, L. 2005. *Popis TVM 2005* [online]. Ostrava: Katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2005. [2009-05-06], dostupné z www: <URL: <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/PodklVyuuka/PopisTVM.htm>>.
- [60] ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ M. 2004. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5.
- [61] ŠVARC, I., ŠEDA, M., VÍTEČKOVÁ, M. *Automatické řízení*. Akademické nakladatelství CERM[®], Brno, 2007, 325 s. ISBN: 978-80-214-3491-2.
- [62] *TAOS TSL 2550* [online]. Light intensity sensor. [2009-06-11], available from www: <URL: <http://home.comet.bg/datasheets/Taos/TSL2550-e75.pdf>>.
- [63] *Technologie WiMAX* [online]. [2009-05-23], dostupné na adrese: <URL: <http://www.wimax.cz>>.
- [64] *TINYOS*. Web Pages of Producer [online]. [2010-04-08], available from www: <URL: www.tinyos.net>.
- [65] VÁŇA, V. 2003. *Mikrokontroléry ATMEL AVR programování v jazyce C*. Nakl. BEN – technická literatura, Praha, 2003. 215 s. ISBN: 80-7300-102-0.
- [66] VELICKÝ, T. 2002. *Datové přenosy po GSM sítích, technologie HSCSD, GPRS a UMTS*. Pedagogická fakulta Jihočeské Univerzity, Katedra informatiky, 2002. Diplomová práce, 84 s.
- [67] VÍTEČKOVÁ, M. 1998. *Seřízení regulátorů metodou inverze dynamiky*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1998. 56 s.

Přehled autorovy publikační činnosti

2007

- MAHDAL, M. 2007. Model nádrží, vizualizace a řízení přes síťové rozhraní. In XXXII. *Seminar ASR '2007 "Instruments and Control"*. VŠB-TU Ostrava, 2007, pp. 149 – 158. ISBN 978-80-248-1272-4.
- KLEČKA, R., MAHDAL, M. 2007. Identifikace a návrh regulátoru pro hydraulicko-pneumatickou soustavu. In XXXII. *Seminar ASR '2007 "Instruments and Control"*. VŠB-TU Ostrava, 2007, pp. 93 – 103. ISBN 978-80-248-1272-4.
- MAHDAL, M. 2007. Control of model through Intranet/Internet network. *Transactions of the VŠB-TU Ostrava, Mechanical Series 2007*, No. 2, vol. LIII, article No. 1556, VŠB-TU Ostrava, 2007, pp. 47-53. 978-80-248-1668-5, ISSN 1210-0471.

2008

- MAHDAL, M., KLEČKA, R. 2008. Komunikace simulátoru dSPACE s vybranými komponenty automobilu. In XXXIII. *Seminar ASR '2008 "Instruments and Control"*. VŠB-TU Ostrava, 2008, pp. 205 – 212. ISBN 978-80-248-1727-9.
- MAHDAL, M. 2008. Vybrané typy bezdrátových technologií a jejich aplikace. In XXXIII. *Seminar ASR '2008 "Instruments and Control"*. VŠB-TU Ostrava, 2008, pp. 199 – 204. ISBN 978-80-248-1727-9.
- MAHDAL, M. 2008. Wireless Technologies and Their Applications. *9th International Carpathian Control Conference ICC'C'2008*. Sinaia, Romania, 2008, pp. 388 – 391. (4 p). ISBN 978-973-746-897-0.
- MAHDAL, M., KLEČKA, R. 2008. Application of CAN Bus with dSPACE Simulator Usage. *Transactions of the VŠB-TU Ostrava, Mechanical Series 2008*, No. 2, vol. LIV, article No. 1626, VŠB-TU Ostrava, 2008, pp. 85-90. ISBN 978-80-248-1870-2, ISSN 1210-0471.

2009

- MAHDAL, M., SMUTNÝ L. 2009. Měření a vizualizace v bezdrátové senzorové síti. In XXXIV. *Seminar ASR '2009 "Instruments and Control"*. VŠB-TU Ostrava, 2009, pp. 191 – 195. ISBN 978-80-248-1953-2.
- KLEČKA, R., TŮMA, J., MAHDAL, M. 2009. Analýza měření s vibrátorem TIRA. In XXXIV. *Seminar ASR '2009 "Instruments and Control"*. VŠB-TU Ostrava, 2009, pp. 115 – 123. ISBN 978-80-248-1953-2.
- SMUTNÝ L., MAHDAL M., ŠKUTA J. 2009. Smart Sensors with PC Connection in Wireless Networks. Recent Advances in Computers. In *Proceedings of the 13th WSEAS*

International Conference on COMPUTERS. Rhodes, Greece: WSEAS Press, July 23-25, 2009, pp. 585–587. ISBN 978-960-474-099-4, ISSN 1790-5109.

BRODECKÁ, K., PRZECZKOVÁ, R., WOLGEMUTH, J., NOSKIEVIČOVÁ, D., MAHDAL, M. 2009. Selected Tools and Methods from Quality Management Field. *Transactions of the VŠB-TU Ostrava, Mechanical Series 2009*, No. 2, vol. LV, article No. 1682, VŠB-TU Ostrava, 2009, pp. 13-16. ISBN 978-80-248-2144-3, ISSN 1210-0471.

KLEČKA, R., TŮMA, J., MAHDAL, M. 2009. Vibration Measurement with Pulse and dSPACE Equipment. *Transactions of the VŠB-TU Ostrava, Mechanical Series 2009*, No. 2, vol. LV, article No. 1689, VŠB-TU Ostrava, 2009, pp. 55-60. ISBN 978-80-248-2144-3, ISSN 1210-0471.

MAHDAL, M., SMUTNÝ, L. 2009. Application for Measurement in Wireless Sensor Networks. *Transactions of the VŠB-TU Ostrava, Mechanical Series 2009*, No. 2, vol. LV, article No. 1694, VŠB-TU Ostrava, 2009, pp. 85-90. ISBN 978-80-248-2144-3, ISSN 1210-0471.

2010

MAHDAL, M., FRISCHER, R. 2010. Nedestruktivní diagnostika pevných objektů. In *XXXV. Seminar ASR '2010 "Instruments and Control"*. VŠB-TU Ostrava, 2010, pp. 255 – 260. (6 s). ISBN 978-80-248-2191-7.

ŠKUTA, J., KULHÁNEK, J., MAHDAL, M., 2010. Interconnection of MEMS Systems by the CAN Bus. 11th *International Carpathian Control Conference ICC'2010*. Eger, Hungary, 2010, pp. 91 – 94. (4 p). ISBN 978-963-06-9289-2.

MAHDAL, M., ŠKUTA, J., SMUTNÝ, L. 2010. Wireless Communication with the Support of SCADA/HMI System. 11th *International Carpathian Control Conference ICC'2010*. Eger, Hungary, 2010, pp. 249 – 252. (4 p). ISBN 978-963-06-9289-2.

Další aktivity doktoranda

Hlavní řešitel projektů pro automobilku ŠKODA AUTO a.s., hlavní řešitel Interních grantů a hlavní řešitel či spoluřešitel Fondů rozvoje vysokých škol:

MAHDAL M., KOŇAŘÍK P., VALA D., ŘEPKA M. 2007. *Využití dotykových displejů a UI v automobilech*. Projekt pro automobilku ŠKODA AUTO a.s., v rámci ESF, 67 s.

MAHDAL M., KLEČKA R. 2008. *Integrace nových display technologií do vozidla*. Projekt pro automobilku ŠKODA AUTO a.s., v rámci ESF, 68 s.

2007 - Interní grant s názvem *Bezdrátová komunikace mezi mobilním telefonem a GSM pagerem*.

2008 - Interní grant s názvem *Bezdrátová technologie ZigBee a její aplikace*.

2008 - Fond rozvoje (FRVŠ) s názvem *Využití bezdrátové komunikace pro výukové účely*.

2009 - spoluřešitel Fondu rozvoje (FRVŠ) s názvem *Řízení modelu pomocí simulátoru dSPACE*.

Od roku 2009 práce na grantu EU, 7 Rámcového programu s názvem FutureSME pro malé a střední podniky.

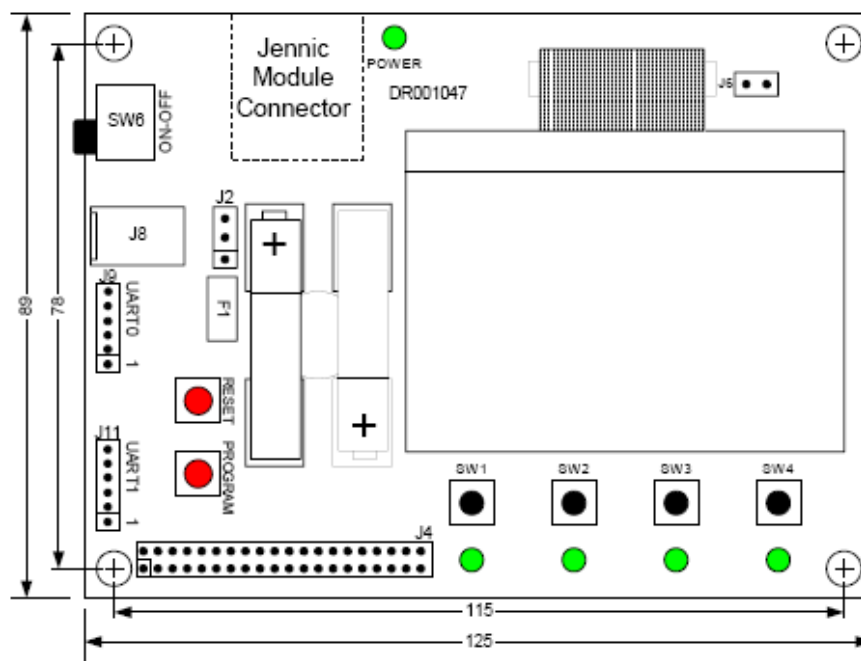
Studium v zahraničí

Doktorand se zúčastnil půlroční zahraniční stáže ve Švédsku na Linköpings universitet v rámci programu Erasmus.

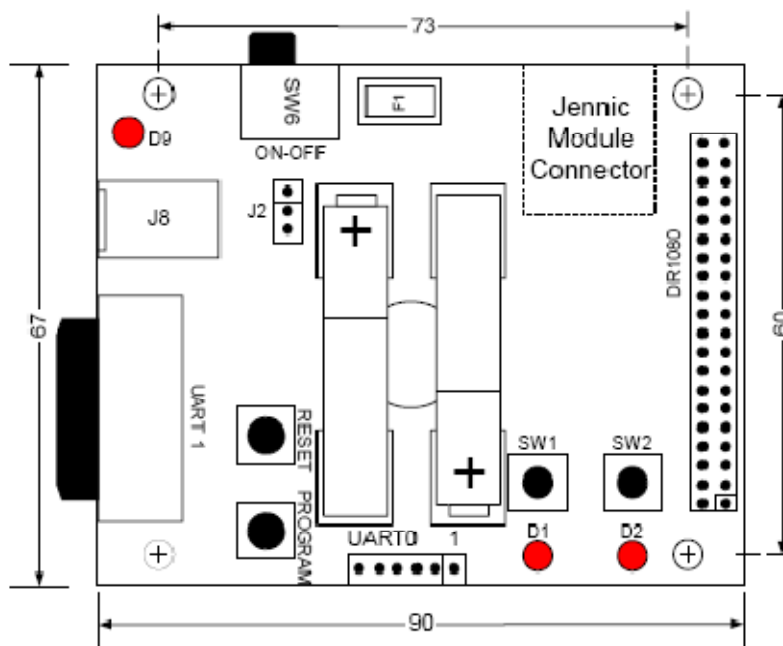
Přílohy

Příloha I Řídicí a senzorová deska pro připojení bezdrátového modulu

Řídicí deska



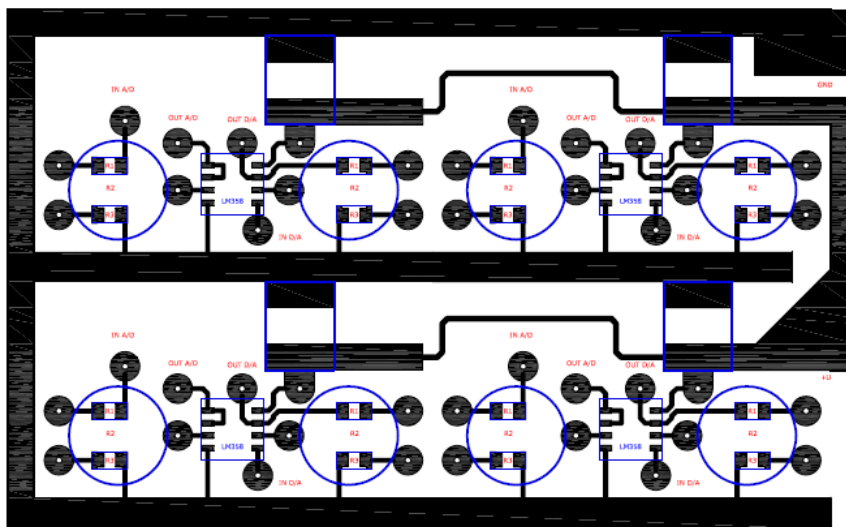
Senzorová deska



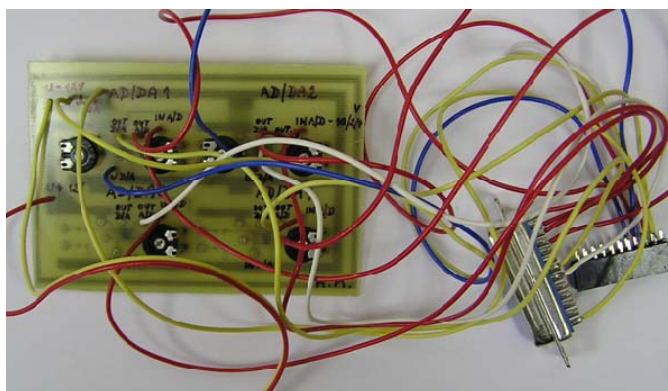
Příloha II Deska elektronického obvodu a deska nabíjecího obvodu Li-ION akumulátoru

Deska elektronického obvodu pro přizpůsobení napětí mezi elektronickou jednotkou teplovzdušného modelu a bezdrátovým modulem.

Deska plošného spoje elektronického obvodu

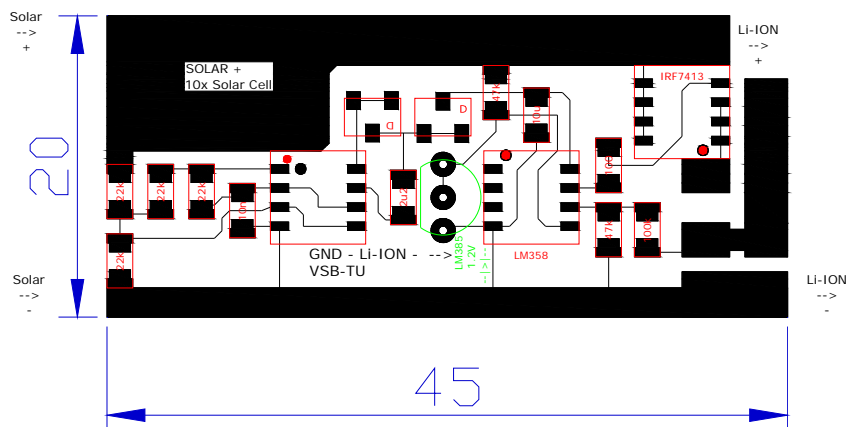


Deska elektronického obvodu s napájenými součástkami a konektory



Deska nabíjecího obvodu pro Li-ION akumulátor ze zdroje solárního panelu.

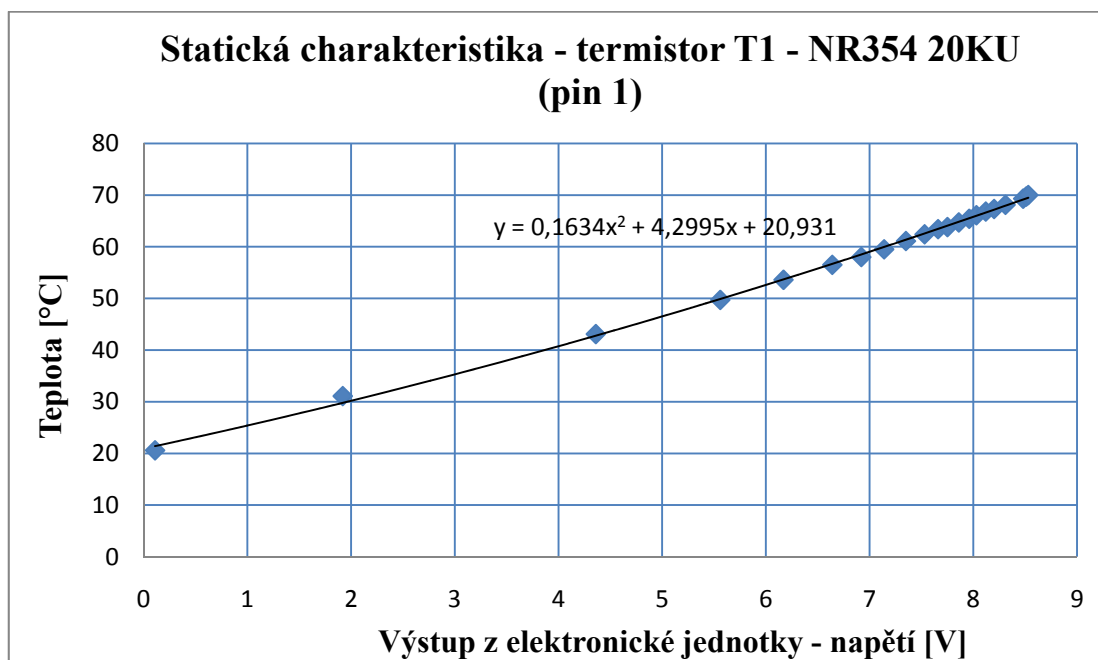
Deska plošného spoje regulátoru nabíječící Li-ION akumulátor



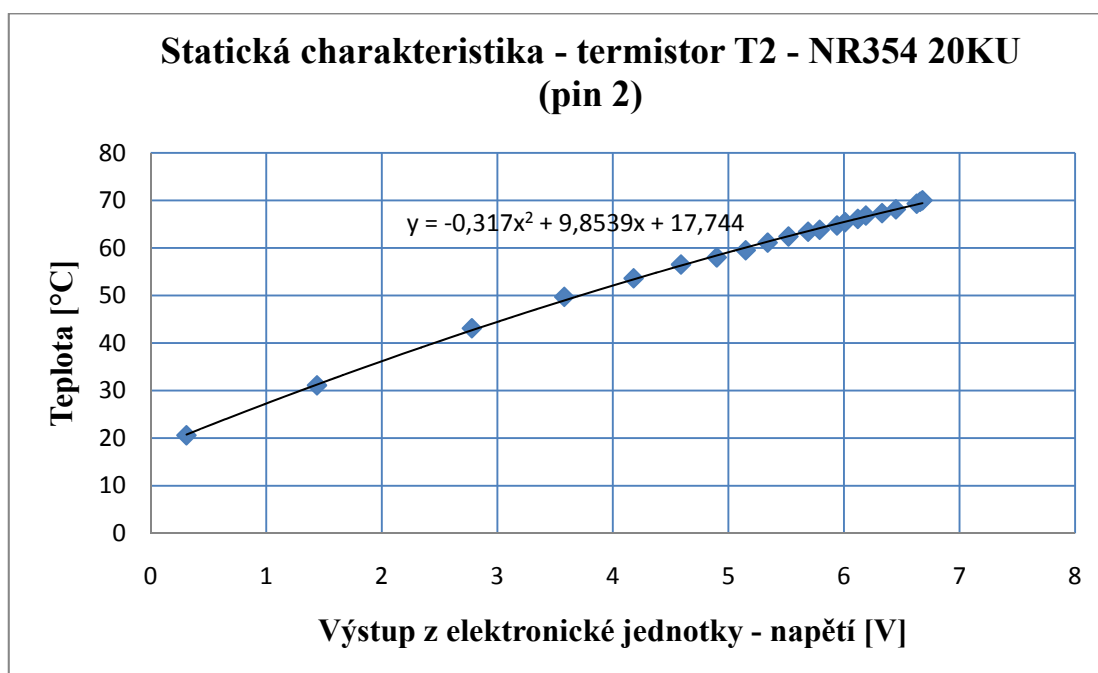
Příloha III Statické charakteristiky pro jednotlivé soustavy termistorů teplovzdušného modelu

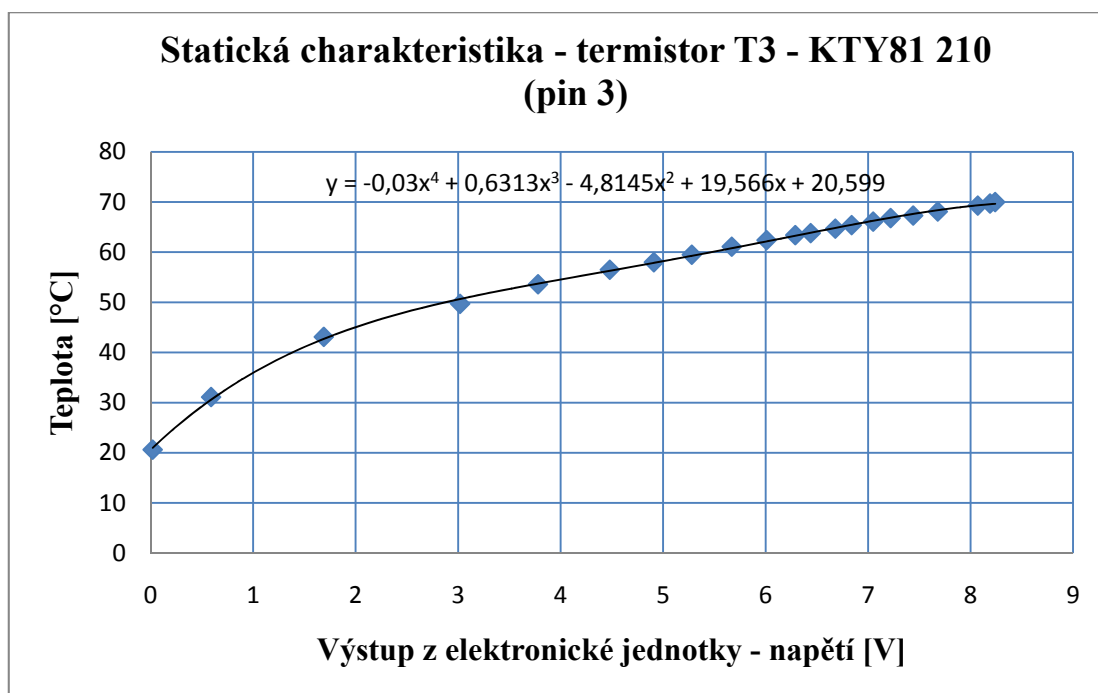
Statické charakteristiky byly měřeny pomocí termočlánku ALMEMO 2290-8 sondou NiCr-Ni, která byla vložena do teplovzdušné soustavy do bezprostřední blízkosti zdroje tepla, žárovky. Jedná se o sondu typu K a měření bylo prováděno při okolní teplotě 27 °C.

Statická charakteristika pro soustavu termistor T1



Statická charakteristika pro soustavu termistor T2



Statická charakteristika pro soustavu termistor T3

Příloha IV Použité a programované AT příkazy

AT příkaz	Parametry	Odpovědi modulu	Popis
BGV	-	OKP	Měření napětí napájecích akumulátorů.
BGT	-	OKP	Měření teploty.
BGL	-	OKP	Měření osvětlení.
BGH	-	OKP	Měření relativní vlhkosti.
BGR	-	OKP	Požadavek na zjištění stavu tlačítek na senzorových deskách.
BGF	-	OKP	Požadavek na zjištění stavu tlačítek na řídicích deskách.
BLO	Číslo LED 0: LED 1 1: LED 2 2: LED 3 3: LED 4	OK	Zapnutí LED diod na senzorových nebo řídicích deskách.
BLF	Číslo LED Stejně jako u BLO	OK	Vypnutí LED diod na senzorových nebo řídicích deskách.
PRT	-	OKP	Dotaz na zjištění aritmetického průměru z x měření teploty.
PRH	-	OKP	Dotaz na zjištění aritmetického průměru z x měření relativní vlhkosti.
PRV	-	OKP	Dotaz na zjištění aritmetického průměru z x měření napětí akumulátorů.
RPH	-	OK	Reset parametrů pro zahájení nového měření.
MIT	-	OKP	Zjištění minimální hodnoty z měření teploty.
MAT	-	OKP	Zjištění maximální hodnoty z měření teploty.
MIH	-	OKP	Zjištění minimální hodnoty z měření relativní vlhkosti.
MAH	-	OKP	Zjištění maximální hodnoty z měření relativní vlhkosti.
MIV	-	OKP	Zjištění minimální hodnoty z měření napětí akumulátorů.
MAV	-	OKP	Zjištění maximální hodnoty z měření napětí akumulátorů.
RZT	-	OKP	Zjištění rozpětí hodnot z měření teploty.
RZH	-	OKP	Zjištění rozpětí hodnot

			z měření relativní vlhkosti.
RZV	-	OKP	Zjištění rozpětí hodnot z měření napětí akumulátorů.
BTX	Text Řádek: 0-7 Sloupec: 0-127	OK	Zobrazení textu na určité pozici LCD displeje řídicí desky.
BND	Lokální služba: 1-32 MAC adresa vzdáleného modulu: 64 bitová adresa Služba vzdáleného modulu: 1-32	OK ERR	Příkaz vytvoří spojení mezi službami.
UBN	Stejné parametry jako u příkazu BND	OK ERR	Odpojení vazeb mezi službami.
SND	Adresa vzdáleného modulu: 64 bitová adresa Přenášená data Počet přenášených bytů dat Značka stanice: 0-15	OK PKS PKF ERR	Odeslání dat do vzdáleného modulu.
REG	Služby: 32 bitová hodnota (0 služba 1, 1 služba 2)	OK RSR ERR	Registrace služby na lokálním modulu.
RQS	Služby: 32 bitová hodnota Typ požadavku: 0 určitá služba 1: všechny služby	OK SRR ERR	Příkaz sloužící k odeslání požadavku na seznam služeb na další moduly.
RST	-	OK ERR	Reset bezdrátového modulu.
SLP	Časovač a stav paměti (E): 0: časovač aktivní a držení paměti 1: časovač aktivní, paměť není držena 2: časovač neaktivní, paměť držena 3: časovač neaktivní, paměť není držena 4: hluboký spánek	OK ERR	Nastavení modulu (koncové stanice) do režimu sleep (spánkového režimu).
SSP	Perioda spánku (E): délka v milisekundách	OK ERR	Nastavení periody spánku pro koncovou stanici.
TCN	Lokální tunelová služba: ID v rozsahu 1-32 Adresa vzdáleného modulu: 64 bitová adresa Vzdálená tunelová služba: ID v rozsahu 1-32	OK PKS PKF ERR BSY	Vytvoření tunelového spojení se vzdáleným modulem a svázání služeb mezi moduly.
TCM	Příkaz: řetězec jako „TOP“	OK TNR ERR	Příkaz tunelového spojení do vzdáleného modulu.
TOP	-	OK PKS PKF ERR BSY	Otevření tunelového spojení. S použitím příkazu TCM.
TCL	-	OK PKS PKF ERR BSY	Ukončení tunelového spojení mezi moduly.

<i>LVE</i>	-	OK ERR	Odpojení modulu ze sítě.
<i>CCF</i>	Přenosová rychlost pro UART: výchozí hodnota 115200 Číselný systém: 0 decimal 1 hexadecimal Kontrolní součet: 0 zakázán 1 povolen Potvrzení příkazu: 0 vypnuto 1 zapnuto Metoda kódování příkazů: 0 ASCII 1 binární	OK ERR	Konfiguruje analyzátor příkazů.
<i>CCS</i>	Uložení či reset nastavení analyzátoru: 0 obnovuje výchozí nastavení 1 obnovuje tovární nastavení 2 uloží nové nastavení do flash paměti	OK ERR	Ukládá nebo obnovuje nastavení analyzátoru příkazů.
<i>CFG</i>	Přenosový kanál (auto skenování kanálu): 32 bitová hodnota kanálu pro kanál 11-26 (pro žádné skenování hodnota 0x07FFF800) Max. počet připojených dětí (C,R): 0-16 Max. počet připojených koncových stanic (C,R): 0-8 Počet chybných komunikací než rodič nebo dítě ohlásí jejich ztrátu: 1-255 Časový limit čekající na komunikaci s koncovou stanicí (pokud v tomto čase nepřijde zpráva od koncové stanice, je považována za ztracenou): 32 bitová hodnota.	OK ERR	Konfiguruje síťové parametry na bezdrátovém modulu.
<i>CFP</i>	Perioda auto-pingu generovaná směrem od směrovače k jeho rodičům (R): 0 zakázáno, 1-6553 sekund Cyklus spánku mezi pingy (E): 0 zakázáno, 1-255 Čas spánku koncové stanice po neúspěšném skenování (hledání rodiče): v milisekundách Perioda kdy koncová stanice žádá svého rodiče o data (E): 32 bitová hodnota Maximální počet přeskoků (hopů) pro broadcast zprávy: 0-255	OK ERR	Konfiguruje síťové parametry na bezdrátovém modulu.
<i>INI</i>	PAN ID (C): 16 bitová hodnota Rádiový kanál (C): 0 automatický výběr, 11-26 pro ruční výběr Síťové aplikační ID: 32 bitová hodnota Obnovení obsahu dat uložené příkazem SCN: 0 zakázáno, 1 povoleno Povolení směrování (R, C): 0 zakázáno, 1 povoleno	OK ERR	Konfiguruje a inicializuje zařízení (modul).
<i>STR</i>	Modul: 0 – koordinátor 1 – směrovač	OK NTU ERR	Spouští zařízení jako koordinátor, směrovač nebo koncové zařízení.

	2 – koncová stanice		
<i>SCN</i>	Ukládá nebo maže obsah: 0 maže obsah, 1 ukládá obsah	OK ERR	Ukládá nebo maže uložená nastavení bezdrátových modulů v paměti (nastavení síťová i aplikační).

Popisky ve sloupci u jednotlivých parametrů typu C, R, E znamenají pro jaký typ modulu je parametr určen [C – Coordinator (koordinátor), R – Router (směrovač), E – End Device (koncová stanice)].

Příloha V Seznam použitých AT příkazů pro ovládání MT z bezdrátového modulu

Příkaz	Význam	Odpověď MT	Poznámka
ATDxxxxxxxxx<CR>	Zahájí volání na telefonní číslo xxxxxxxx.	OK	
ATA<CR>	Vyzvednutí příchozího hovoru.	OK	
AT+CPBR<CR>	Vyčte z MT seznam telefonních čísel např. AT+CPBR=1,4<CR>.	+CPBR: 1,"111222333",129,"JA" +CPBR: 2,"222111444",129,"JIRI" +CPBR: 3,"456765333",129,"PETR" +CPBR: 4,"981234567",129,"TOMAS" OK	Znamená, že vyčte záznamy od místa 1 do místa 4.
AT+CPBS<CR>	Definuje pozici telefonního seznamu v MT, např. AT+CPBS="SM"<CR>.	OK	"SM" = znak pro výběr telefonního seznamu na SIM kartě "ME" = znak pro výběr telefonního seznamu v mobilním telefonu Default = "SM".
AT+CPMS<CR>	Definuje paměť pro práci se SMS, např. AT+CPMS="SM","SM"<CR>.	+CPMS,1,10,1,10 OK	"SM" = paměť SIM karty "ME" = paměť telefonu.
AT+CMSS<CR>	Odešle SMS zprávu uloženou v seznamu, např. AT+CMSS=1,+420111222333<CR>	+CMSS: 104 OK	Číslo v příkazu udává pozici zprávy v seznamu.
AT+CMGS<CR>	Odeslání SMS ve tvaru PDU. Po zadání tohoto příkazu je možné odeslat SMS v PDU formátu, př. viz níže.	+CMGS: (reference zprávy) OK	Popsáno níže
AT+CBC<CR>	Udává výdrž akumulátoru v procentech a jeho stav	+CBC: <bcs>, <bcl> OK	0 = nedobíjí, napájení z akumulátoru 1 = dobíjí připojený akumulátor 2 = nemá připojen akumulátor 3 = Error 0 = akumulátor vybit 1-100 = stav dobíjení akumulátoru v %